



UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE

Faculté de génie
Département de génie mécanique

Imprégnation du bois assistée par des ondes de pression

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie mécanique

Junior LAGRANDEUR

Jury : Martin BROUILLETTE (directeur)
Noureddine ATALLA
Danick DUPONT

Sherbrooke, Québec, Canada

Mars 2010

11-2042



Library and Archives
Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*
ISBN: 978-0-494-65592-4
Our file *Notre référence*
ISBN: 978-0-494-65592-4

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

Résumé

Cette recherche visait à développer un procédé d'imprégnation utilisant des ondes de choc pour teindre du bois franc. D'importants progrès ont été réalisés à cet égard dans le projet.

Tout d'abord, un modèle théorique a montré que les ondes de choc augmentent la pénétration dans un milieu poreux de perméabilité constante, mais seulement si le liquide utilisé est rhéofluidifiant. De plus, les ondes de choc semblent atténuer les variations de perméabilité, ce qui permettrait de teindre des espèces moins perméables et de donner au bois un fini plus uniforme.

En second lieu, les essais expérimentaux réalisés sur des échantillons de merisier dans un tube à choc ont confirmé que les ondes de choc imprègnent efficacement le bois. Effectivement, il a été démontré qu'une augmentation du nombre de tirs et de l'amplitude des chocs améliorent l'imprégnation sous certaines conditions. De plus, les ondes de choc peuvent être combinées avec un prétraitement du bois aux micro-ondes pour une meilleure imprégnation. Cependant, la grande variabilité des résultats entre chaque série de mesure ne permet pas de prédire la pénétration en fonction des conditions du choc, possiblement parce que l'efficacité du procédé dépend du taux d'humidité du bois.

Finalement, deux mécanismes sont proposés pour expliquer l'effet bénéfique des ondes de choc sur l'imprégnation. Premièrement, l'augmentation importante de la pression causée par l'onde de choc pourraient endommager la microstructure du bois, en augmentant sa perméabilité. Cependant, cette hypothèse n'a pu être validée. Ensuite, comme la teinture a un comportement rhéofluidifiant, les chocs réduisent possiblement sa viscosité. Cette hypothèse rejoint les conclusions obtenues grâce au modèle théorique et elle explique plusieurs résultats des essais expérimentaux.

Bois ; Ondes de choc ; Teinture ; Absorption ; Pénétration ; Modélisation ; Analyse de la variance ; Rhéologie

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier mon directeur de maîtrise, le professeur Martin Brouillette. C'est lui qui m'a proposé de réaliser ce projet passionnant. Il m'a assisté et soutenu tout au long du processus de réalisation tout en me permettant de faire mes propres expériences. Grâce à cela, je suis mieux outillé pour la suite de ma carrière.

Je voudrais également remercier les professeurs Gamal Baroud et Raymond Panneton, qui m'ont tous deux donné généreusement de leur temps. De plus, ils m'ont permis d'utiliser gratuitement certains de leurs équipements de pointe, ce qui s'est avéré crucial pour la réussite de ce projet.

Madame Irène Kelsey-Lévesque du Centre de Caractérisation des Matériaux (CCM) mérite également une bonne place dans cette section. Sans son aide précieuse, je n'aurais pas réussi à obtenir de belles images à l'aide du microscope électronique à balayage.

Je me dois aussi de remercier le Centre de Recherche Industrielle du Québec, et particulièrement messieurs Jean-Claude Ouellet et Danick Dupont, pour avoir initié ce beau projet et pour avoir mis à notre disposition votre temps et vos équipements.

Merci également au CRSGN qui, via une bourse d'études supérieures du Canada (BESC) Alexander-Graham-Bell, m'ont donné les ressources financières me permettant de mener cette maîtrise à son terme.

Un gros merci à mes collègues du LOCUS qui ont su rendre les deux années que j'y ai passées si agréable et qui m'ont maintes fois donné un coup de main lorsque j'en avais besoin.

Finalement, je voudrais adresser un merci tout particulier à ma merveilleuse femme, sans le soutien de qui, rien de tout cela n'aurait été possible.

Junior Lagrandeur

Table des matières

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUCTION | 1 |
| 1.1 | Problématique | 1 |
| 1.2 | Résumé des études déjà réalisées | 2 |
| 1.3 | Objectifs de la recherche | 4 |
| 1.4 | Méthodologie | 4 |
| 2 | RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE | 7 |
| 2.1 | Le bois en tant que milieu poreux | 7 |
| 2.1.1 | Caractéristiques macroscopiques des milieux poreux | 8 |
| 2.1.2 | Modélisation d'un écoulement dans le bois : état actuel | 11 |
| 2.2 | Caractéristiques anatomiques du bois | 16 |
| 2.2.1 | Microstructure | 16 |
| 2.2.2 | Zone anatomique sur le bois | 21 |
| 2.3 | Imprégnation du bois à l'échelle industrielle | 23 |
| 2.3.1 | Imprégnation : état actuel | 23 |
| 2.3.2 | Utilisation d'onde de pression pour le traitement du bois | 25 |
| 2.3.3 | Autres avenues prometteuses pour l'imprégnation du bois | 33 |
| 2.4 | Génération d'onde de choc | 34 |
| 2.4.1 | Tube à choc | 35 |
| 2.4.2 | Générateurs électroniques | 36 |
| 2.4.3 | Autres méthodes de génération d'ondes de choc | 38 |
| 2.4.4 | Comparaison des différentes méthodes | 40 |
| 3 | MODÉLISATION D'UN ÉCOULEMENT DANS LE BOIS | 41 |
| 3.1 | Développement du modèle mathématique | 41 |
| 3.1.1 | Hypothèses | 41 |
| 3.1.2 | Développement des bilans | 42 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.1.3 | Modélisation du choc | 47 |
| 3.1.4 | Résolution numérique de l'équation différentielle | 50 |
| 3.2 | Mesure des propriétés de la teinture | 51 |
| 3.2.1 | Mesure de la densité | 51 |
| 3.2.2 | Mesure de la vitesse du son | 52 |
| 3.2.3 | Mesure de la viscosité | 56 |
| 3.3 | Validation du modèle à l'aide de cas extrême | 60 |
| 3.3.1 | Conduite de section constante sous l'effet d'un gradient de pression . | 60 |
| 3.3.2 | Régime permanent | 61 |
| 3.3.3 | Vérification de la perméabilité en tout point | 62 |
| 3.4 | Étude du modèle pour le tube à choc | 63 |
| 3.4.1 | Identification des facteurs et paramètres étudiés | 63 |
| 3.4.2 | Résultats | 66 |
| 4 | ESSAI D'IMPRÉGNATION DU BOIS | 75 |
| 4.1 | Conception des deux montages utilisés | 75 |
| 4.1.1 | Tube à choc vertical | 75 |
| 4.1.2 | Cylindre pressurisé avec générateur électronique | 81 |
| 4.2 | Procédure d'imprégnation du bois | 85 |
| 4.2.1 | Préparation des échantillons | 86 |
| 4.2.2 | Utilisation sécuritaire de la teinture | 88 |
| 4.2.3 | Procédure de test avec le tube à choc | 89 |
| 4.2.4 | Protocole de test pour le cylindre sous-pression | 90 |
| 4.3 | Protocole de mesure | 91 |
| 4.3.1 | Mesure de l'absorption | 91 |
| 4.3.2 | Mesure de la pénétration | 92 |
| 4.3.3 | Mesure de la dureté | 96 |
| 4.4 | Visualisation de la microstructure | 98 |
| 4.4.1 | Microscope électronique à balayage (MEB) | 98 |
| 4.4.2 | Microtomographe | 102 |
| 4.4.3 | Comparaison des deux instruments | 106 |
| 4.5 | Expérimentation | 106 |
| 4.5.1 | Premier plan d'expérience | 106 |
| 4.5.2 | Étude des effets de deuxième ordre concernant le nombre de tirs . . . | 108 |
| 4.5.3 | Plan d'expérience complet à 4 facteurs | 114 |
| 4.5.4 | Tests sur du merisier modifié et sur deux autres espèces de bois franc | 125 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.5.5 | Tests à l'aide du cylindre pressurisé | 137 |
| 4.5.6 | Suite à donner aux essais d'imprégnation | 142 |
| 5 | CONCLUSION | 145 |
| 5.1 | Résumé des travaux | 145 |
| 5.2 | Apport original de la recherche | 147 |
| 5.3 | Projection future | 148 |
| A | RÉSULTATS NUMÉRIQUES DE L'ANALYSE THÉORIQUE | 151 |
| B | DESSIN DE FABRICATION DU CYLINDRE PRESSURISÉ | 155 |
| C | PROVENANCE DES ÉCHANTILLONS MAISON | 163 |
| D | RÉSULTATS NUMÉRIQUES DES ESSAIS EXPÉRIMENTAUX | 169 |
| | BIBLIOGRAPHIE | 176 |

Table des figures

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Effet de la mouillabilité d'une surface | 10 |
| 2.2 | Diagramme x-t de la réflexion d'un choc sur un milieu poreux | 14 |
| 2.3 | Évolution temporelle de la pression à l'intérieur d'un échantillon de bois, procédé de Bethell | 15 |
| 2.4 | Évolution temporelle de la pression d'un milieu poreux à la suite de la réflexion d'un choc normal à sa surface | 15 |
| 2.5 | Microstructure d'un bois mou et d'un bois dur à pores diffus | 17 |
| 2.6 | Vue tridimensionnelle au MEB d'un échantillon d'épinette montrant différents types de ponctuations | 19 |
| 2.7 | Différents types de ponctuations dans le bois | 20 |
| 2.8 | Structure macroscopique du bois | 22 |
| 2.9 | Diagramme des principaux cycles de traitement sous-pression | 24 |
| 2.10 | Forme de l'onde de pression utilisée par PAGE et REED [1969] | 26 |
| 2.11 | Schéma de l'usine de traitement du bois breveté par MYERS [1970] | 29 |
| 2.12 | Coupe radiale d'une ponctuation auréolée après l'application simultanée d'une pression statique et d'ultrasons | 30 |
| 2.13 | Schéma d'un générateur thermohydraulique | 38 |
| 2.14 | Exemple de montage pour générer une onde de choc dans l'eau à l'aide d'un laser | 39 |
| 3.1 | Schéma des volumes de contrôle du modèle dynamique | 42 |
| 3.2 | Modification apportée par un choc sur la pression externe dans le modèle | 48 |
| 3.3 | Transducteur piézoélectrique et récipient servant à mesurer la vitesse du son dans un liquide | 53 |
| 3.4 | Montage servant à mesurer la vitesse du son dans un liquide | 54 |
| 3.5 | Trace temporelle de l'impulsion émise et de l'écho reçu par le transducteur tel qu'enregistrée sur l'oscilloscope | 55 |

| | | |
|------|---|----|
| 3.6 | Résultat des trois séries de mesures rhéologiques pour la teinture Minwax . . . | 57 |
| 3.7 | Lissage de la loi de puissance et du modèle de Powell-Eyring pour représenter le comportement rhéologique de la teinture Minwax | 58 |
| 3.8 | Pénétration de la teinture en fonction du temps dans le cas où le diamètre représentatif est celui des rayons. La durée est égale à 205ms, le nombre de Mach est 2.32, le nombre de tirs est 2 et la perméabilité est égal à $7e-16 \text{ m}^2$. | 68 |
| 3.9 | Pénétration de la teinture en fonction du temps dans le cas où le diamètre représentatif est celui des ponctuations. Les autres conditions sont identiques à celles de la figure 3.8 | 68 |
| 3.10 | Pénétration de la teinture en fonction du temps dans le cas où le diamètre représentatif est celui des ponctuations et pour une très faible perméabilité ($k = 1e-20 \text{ m}^2$). Les autres conditions sont identiques à celles de la figure 3.8 | 69 |
| 3.11 | Pénétration de benzène en fonction du temps dans les mêmes conditions qu'à la figure 3.8 | 69 |
| 3.12 | Effet de la perméabilité sur la pénétration pour les deux diamètres différents. La ligne du haut représente le cas utilisant le diamètre des ponctuations, alors que celle du bas est valable pour le diamètre des rayons. | 70 |
| 3.13 | Variation de la pénétration en fonction des différents paramètres du choc. Pour ce graphique, la perméabilité a une valeur de $7e-16 \text{ m}^2$ | 72 |
| 4.1 | Photo du tube à choc vertical utilisé pour les tests d'imprégnation | 76 |
| 4.2 | Interface utilisateur du programme de modélisation du tube à choc | 78 |
| 4.3 | Diagramme montrant les ondes générés à l'aide de 1000 kPa d'hélium. Les autres conditions sont celles décrite dans le tableau 4.2 | 79 |
| 4.4 | Diagramme des fonctions du montage d'imprégnation sous-pression | 82 |
| 4.5 | Photo du montage fabriqué pour imprégner le bois à l'aide d'un générateur piézoélectrique | 84 |
| 4.6 | Pince servant à maintenir l'échantillon en place dans le cylindre de traitement | 84 |
| 4.7 | Échantillon dans leur bocal de trempe après quelques jours. L'eau a pris une teinte jaunâtre. | 87 |
| 4.8 | Moyenne mensuelle de la teneur en humidité de différentes essences de bois mesuré sur une période de 18 mois : 1, hêtre ; 2, chêne blanc ; 3, châtaignier ; 4, pin noir et EMC, la valeur estimée de la teneur en humidité. Le lieu où ces valeurs ont été observées n'est pas indiqué [TSOUMIS, 1991]. | 93 |
| 4.9 | Programme servant à mesurer la pénétration | 95 |
| 4.10 | Bille, tôle et échantillon utilisés lors des tests de dureté. | 97 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.11 | Photo à haute résolution de la surface tangentielle d'un échantillon de bouleau jaune en mode électrons secondaires montrant l'effet de charge sur le bord des ponctuations | 99 |
| 4.12 | Vue de la face tangentielle d'un échantillon de bouleau jaune en mode électrons rétrodiffusés et avec une pression interne de 60 Pa. | 100 |
| 4.13 | Vue de l'intérieur d'un vaisseau de bouleau jaune prise sur la face tangentielle en mode électrons rétrodiffusés et avec une pression interne de 60 Pa. | 101 |
| 4.14 | Image montrant une plaque de perforation scalariforme à 60 Pa et en mode électrons rétrodiffusés | 101 |
| 4.15 | Photo à faible résolution et à fort grossissement (7000X) de ponctuations intervasculaires prise sur la face tangentielle en mode électron secondaire. . . | 102 |
| 4.16 | Coupe transversale d'un échantillon de bouleau jaune vue par le microtomographe | 104 |
| 4.17 | Vue tangentielle d'un échantillon de bouleau jaune vue par le microtomographe | 104 |
| 4.18 | Vue radiale d'un échantillon de bouleau jaune vue par le microtomographe . | 105 |
| 4.19 | Distribution normale des résidus de Student sans aucune transformation des données | 110 |
| 4.20 | Variation de l'absorption en fonction de la masse initiale des échantillons traités | 112 |
| 4.21 | Inverse de l'absorption de teinture en fonction du nombre de tirs en utilisant un nombre de Mach de 1,75. | 113 |
| 4.22 | Inverse de l'absorption de teinture en fonction du nombre de tirs en utilisant un nombre de Mach de 2,5. | 113 |
| 4.23 | Interaction entre le nombre de Mach (B) et le nombre de tirs (C) lorsque la teinture est utilisée tel quelle. | 119 |
| 4.24 | Interaction entre le nombre de Mach (B) et le nombre de tirs (C) lorsque la teinture est dégazée avant les tests. | 119 |
| 4.25 | Variation de l'absorption de teinture pas dégazée en fonction de la durée pour deux nombres de tirs différents (Mach = 1,92). | 120 |
| 4.26 | Variation de l'absorption de teinture pas dégazée en fonction de la durée pour deux nombres de tirs différents (Mach = 2,72). | 120 |
| 4.27 | Pourcentage de pixels colorés à dix millièmes de pouces de profondeur en fonction du nombre de Mach du choc incident. | 121 |
| 4.28 | Pourcentage de pixels colorés à 30 millièmes de pouces de profondeur en fonction du nombre de Mach du choc incident. | 121 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.29 | Variation de la pénétration mesurée au laboratoire en fonction de la durée en utilisant de la teinture non dégazée. | 124 |
| 4.30 | Variation de la pénétration mesurée au laboratoire en fonction de la durée en utilisant de la teinture dégazée. | 124 |
| 4.31 | Absorption de teinture pour trois essences de bois durs à pores diffus et pour du bouleau jaune modifié au micro-ondes | 130 |
| 4.32 | Coupes numérisées de six échantillons de merisier prétraités au micro-ondes. | 132 |
| 4.33 | Variation de la racine carrée de la pénétration mesurée au laboratoire dans le bouleau jaune original en fonction du nombre de Mach. | 134 |
| 4.34 | Variation de la racine carrée de la pénétration mesurée au laboratoire dans le bouleau jaune prétraité en fonction du nombre de Mach. | 134 |
| 4.35 | Racine de l'absorption de teinture en fonction du cycle de pression sélectionné pour les tests dans le cylindre pressurisé | 141 |
| 4.36 | Résidus de Student en fonction de l'angle d'incidence des ondes | 141 |
| 4.37 | Distribution des résidus selon leur pourcentage de probabilité normale pour la racine de l'absorption des tests avec le cylindre pressurisé | 142 |
| B.1 | Dessin d'assemblage du cylindre d'imprégnation sous pression | 156 |
| B.2 | Dessin de fabrication du corps du cylindre d'imprégnation | 157 |
| B.3 | Dessin de fabrication du couvercle du bas du cylindre | 158 |
| B.4 | Dessin de fabrication des portes échantillons utilisés dans le cylindre d'imprégnation | 159 |
| B.5 | Dessin de fabrication de l'extrémité supérieure du cylindre de traitement | 160 |
| B.6 | Dessin de fabrication du support du guide d'onde | 161 |
| C.1 | Vue de face des échantillons de merisier S01 à S25 | 164 |
| C.2 | Vue de dos des échantillons de merisier S01 à S25 | 164 |
| C.3 | Vue de face des échantillons de merisier S26 à S40 | 165 |
| C.4 | Vue de dos des échantillons de merisier S26 à S40 | 165 |
| C.5 | Vue de face des échantillons de merisier S41 à S65 | 166 |
| C.6 | Vue de dos des échantillons de merisier S41 à S65 | 166 |
| C.7 | Vue de face des échantillons de merisier M1 à M33 | 167 |
| C.8 | Vue de face des échantillons d'érable E1 à E20 (à gauche) et de peuplier P1 à P20 (à droite) | 167 |
| C.9 | Vue de face des échantillons de merisier M41 à M60 | 168 |
| C.10 | Vue de dos des échantillons de merisier M41 à M60 | 168 |

Liste des tableaux

| | | |
|-----|--|-----|
| 3.1 | Définition des états de l'air et du gaz sous-pression dans un tube à choc. . . | 49 |
| 3.2 | Mesure de la vitesse du son dans la teinture Minwax | 56 |
| 3.3 | Paramètres utilisés pour la conduite de section constante | 60 |
| 3.4 | Paramètres utilisés pour la vérification de la loi de Darcy | 61 |
| 3.5 | Paramètres pouvant influencer l'imprégnation du bois à l'aide d'onde de choc | 63 |
| 3.6 | Paramètres à un seul niveau dans le modèle | 64 |
| 3.7 | Paramètres variant dans le plan d'expérience de la modélisation | 65 |
| 3.8 | Résultats ANOVA pour le modèle théorique en considérant les deux diamètres caractéristiques possibles. | 66 |
| 3.9 | Résultats ANOVA pour le modèle théorique en utilisant le diamètre des rayons | 71 |
| 4.1 | Caractéristiques du tube à choc utilisé pour les tests d'imprégnation | 76 |
| 4.2 | Paramètres utilisés pour la simulation des conditions de test | 77 |
| 4.3 | Conditions simulées dans le tube à choc pour plusieurs pressions d'éclatement différentes | 80 |
| 4.4 | Résultat de tests de validation du nouveau protocole de mesure de la dureté et comparaison les dureté de Janka [USDA, 1999] | 98 |
| 4.5 | Réglages utilisés pour observer le bois à l'aide du microtomographe | 103 |
| 4.6 | Résultats ANOVA après la transformation $1/y$ de l'étude de la courbure sur le nombre de tir | 111 |
| 4.7 | Résultats ANOVA obtenue sur le logiciel Minitab après la transformation $1/y$ de l'étude de la courbure sur le nombre de tirs. Les absorptions ont été corrigées en fonction de leur masse initiale, et non en fonction des blocs. . . . | 111 |
| 4.8 | Calcul des longueurs de la chambre haute pression pour la réalisation des tests | 115 |
| 4.9 | Résultats ANOVA pour les mesures d'absorption dans le plan d'expérience complet à 4 facteurs | 117 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.10 | Résultats ANOVA pour les mesures de pénétration réalisée au laboratoire dans le plan d'expérience complet à 4 facteurs | 122 |
| 4.11 | Mesure du taux d'humidité relative au laboratoire durant la période de réalisation des tests | 127 |
| 4.12 | Moyenne mensuelle des conditions climatiques mesurées à Sherbrooke en 2008. Les valeurs marquées d'une étoile sont basées sur des données incomplètes [EnvironnementCanada, 2008]. | 127 |
| 4.13 | Normales climatiques pour la station d'observation de Sherbrooke [EnvironnementCanada, 2008]. | 128 |
| 4.14 | Résultats ANOVA avec une transformation logarithmique pour les mesures d'absorption réalisés sur quatre essences de bois différentes. | 129 |
| 4.15 | Résultats ANOVA avec une transformation logarithmique pour les mesures de pénétration réalisés sur quatre essences de bois différentes. | 131 |
| 4.16 | Résultats ANOVA pour la racine des mesures de pénétration des échantillons de bouleau jaune traités au micro-ondes et d'origine. | 135 |
| 4.17 | Résultats ANOVA à la suite d'une transformation des données de type racine carrée des résultats d'absorption des tests réalisés sur le cylindre pressurisé. . | 140 |
| A.1 | Plan d'expérience et résultats numériques de l'analyse théorique | 153 |
| D.1 | Premier plan d'expérience et ses résultats numériques | 169 |
| D.2 | Plan d'expérience et résultats numériques des tests étudiant les effets de deuxième ordre sur le nombre de tirs | 170 |
| D.3 | Plan d'expérience et résultats numériques des essais à quatre facteurs | 172 |
| D.4 | Plan d'expérience et résultats numériques des deux dernières séries d'essais à quatre facteurs | 173 |
| D.5 | Plan d'expérience et résultats numériques pour les essais avec trois essences de bois et du merisier prétraité au micro-ondes | 175 |
| D.6 | Plan d'expérience et résultats numériques des tests réalisés avec le cylindre sous-pression | 176 |

Chapitre 1

INTRODUCTION

1.1 Problématique

Le bois est utilisé par l'homme depuis la nuit des temps. De nos jours, le bois reste encore un matériau d'actualité, et ce, malgré l'arrivée des plastiques et des composites. En plus de ses grandes qualités esthétiques et environnementales (sa capacité à séquestrer le carbone notamment) [NADEAU, 2006], le bois possède des propriétés mécaniques intéressantes, dont une bonne résistance à la flexion et une faible densité.

Or, le bois n'est pas parfait. Les hommes ont donc cherché à l'améliorer de différentes façons, la méthode la plus ancienne consistant à l'imprégner à l'aide d'une substance modifiant ses propriétés. Les substances les plus communément utilisées dans un processus d'imprégnation sont les biocides pour protéger le bois de la dégradation, les ignifugeants pour ralentir sa combustion et la teinture pour en modifier la couleur.

Pour être efficace, un procédé d'imprégnation doit faire pénétrer une quantité suffisante de substance dans les pores du bois. C'est particulièrement important pour le bois traité aux biocides. Dans ce cas, la concentration de composé dans le bois est critique pour la protection du bois. En plus, la méthode utilisée doit faire pénétrer le produit à une profondeur suffisante pour s'assurer que le traitement conservera son effet même si la surface est endommagée [TSOUMIS, 1991].

À ce jour, les méthodes la plus efficace pour imprégner le bois sont les différents procédés de traitement dans des cuves pressurisées (Bethel, Lowry, etc) [TSOUMIS, 1991]. Cependant, ces

techniques présentent plusieurs désavantages. Leur plus grand défaut est la durée importante d'un cycle de pression, ce qui rend le procédé très coûteux. Pour cette raison, les produits de finition sont généralement appliqués à l'aide d'un applicateur, par exemple un pulvérisateur [CARON, 2006]. Cette méthode est beaucoup plus économique. Cependant, elle ne permet pas d'imprégner le bois en profondeur.

En ce moment, il y a un intérêt de la part des fabricants de meubles et de planchers de bois franc pour augmenter la pénétration de la teinture dans leur produit. Cependant, le procédé utilisé doit être suffisamment rapide pour limiter les coûts, ce qui n'est pas possible avec le traitement dans des cuves pressurisées. Il y aurait donc un marché pour un procédé d'imprégnation du bois rapide et efficace.

La présente étude tente de s'attaquer à cette problématique. Pour arriver à faire pénétrer la teinture liquide plus profondément et très rapidement dans le bois, l'auteur propose d'utiliser des ondes de choc. Ces ondes permettent d'obtenir une pression très élevée pendant une durée très courte. Étant donné la grande puissance des ondes, l'impact généré pourrait permettre d'obtenir des résultats intéressants.

1.2 Résumé des études déjà réalisées

De nombreuses personnes ont tenté d'accélérer l'imprégnation du bois depuis l'invention du procédé de Bethel en 1839. Malgré le fait qu'aucune des méthodes alternatives proposées depuis n'ait réussi à s'imposer à ce jour [NAIR et SIMONSEN, 1994], de nombreux auteurs ont remarqué que l'utilisation d'ondes de diverses natures pouvait accélérer l'imprégnation du bois.

Tout d'abord, plusieurs chercheurs ont utilisé des ondes de pression basse fréquence dans des cuves pressurisées. Tout d'abord, [PAGE et REED, 1969; BURDELL et BARNETT, 1969] cherchaient à réduire le temps de traitement en additionnant une pression dynamique à une pression statique. Plus récemment, NAIR et SIMONSEN [1994, 1995] ont vérifié si l'application d'une pression dynamique sous la forme d'une onde sinusoïdale permettait d'améliorer l'imprégnation du bois comparativement à un traitement sous une pression statique équivalente.

Ensuite, plusieurs auteurs ont tenté d'ajouter le traitement du bois à la liste des nombreuses applications des ultrasons. En utilisant différentes méthodes avec des bois et des produits

différents, BORGIN et CORBETT [1970]; MYERS [1970]; AVRAMIDIS [1988] et MARCOK et KURJATKO [1996] ont montré que les ultrasons ont un effet positif sur l'imprégnation de biocide et d'ignifugeant dans du bois mou.

Finalement, des études récentes réalisées au Japon [ITOH et coll., 1998, 2001] et en Inde [ARUNKUMAR et coll., 2005; JAGADEESH, 2005; RAO et coll., 2005] ont montré que les ondes de choc avaient un effet important sur l'imprégnation et la perméabilité du bois. Ainsi, les recherches au Japon ont porté sur l'utilisation des ondes de choc produites par l'explosion d'un cordeau d'explosif sous l'eau pour briser la microstructure du bois, ce qui facilite le séchage. Pour leur part, les chercheurs indiens ont utilisé un tube à choc vertical pour traiter du bambou et du vatta, en plus de faciliter l'extraction de l'huile de santal. Ces dernières études sont très intéressantes, car cette méthode pourrait imprégner le bois suffisamment rapidement pour teindre des planchers et des meubles.

En général, les différentes méthodes présentées augmentent l'absorption, c'est à dire la quantité de liquide retenue dans le bois. De plus, MARCOK et KURJATKO [1996] ont mesuré une augmentation de la pénétration. Le gain absolu est plus marqué pour les espèces plus perméables [AVRAMIDIS, 1988; MARCOK et KURJATKO, 1996], mais l'augmentation relative semble être supérieure pour les espèces réfractaires dans une autre étude [NAIR et SIMONSEN, 1995].

La plupart des auteurs croient que l'efficacité de ces méthodes de traitement provient des dégâts occasionnés à la microstructure du bois, particulièrement au niveau des ponctuations, ce qui semble être confirmé par les études de OLSSON et coll. [2001] et TORGOVNIKOV et VINDEN [2004]. Les dommages occasionnés faciliteraient le passage du liquide, lui permettant de pénétrer plus en profondeur dans le bois.

Un problème qui semble récurrent dans ces méthodes est la présence de bulles d'air. Alors que certains profitent de la cavitation pour générer des ondes de choc [AVRAMIDIS, 1988], d'autres auteurs [PAGE et REED, 1969; MYERS, 1970; NAIR et SIMONSEN, 1995] affirment que, si rien n'est fait, une couche d'air nuisible se forme à la surface de l'échantillon. Cette couche amortit les ondes, ce qui les empêche de frapper le bois avec leur pleine puissance. Comme le bois est lui-même rempli d'air, ce problème pourrait être difficile à éliminer.

Bien que plusieurs chercheurs aient vérifié l'effet de divers type d'onde sur l'imprégnation du bois, peu de recherche a encore été réalisée avec des ondes de choc. Les ondes de choc permettent de transférer beaucoup d'énergie dans un court intervalle de temps, ce qui pourrait endommager plus rapidement et efficacement la microstructure que les autres types d'ondes.

Ensuite, les études réalisées sur l'effet des ondes de choc sur le bois montrent des résultats très prometteurs, mais elles n'indiquent pas quels sont les paramètres qui favorisent l'imprégnation, comment les ondes de choc interagissent avec le bois et quels sont les paramètres à modifier pour traiter différentes espèces de bois avec des liquides différents. Ainsi, il n'est pas possible d'appliquer directement la technique développée par les chercheurs indiens pour teindre le bois franc nord-américain parce que les études précédentes n'indiquent pas comment adapter la technologie à différents liquides et espèces.

En conséquence, pour pouvoir teindre le bois franc, il est nécessaire de vérifier si la technique permet d'obtenir des résultats intéressants dans ce cas précis et d'étudier l'effet des différents paramètres sur l'absorption et la pénétration de teinture. De plus, vérifier l'hypothèse selon laquelle l'amélioration du traitement provient d'une augmentation de la perméabilité du bois permettrait d'aiguiller des études subséquentes sur le sujet.

1.3 Objectifs de la recherche

Objectif général : Développer un procédé d'imprégnation utilisant des ondes de choc pour teindre plusieurs essences de bois franc nord-américain. Ce procédé devra permettre d'augmenter la pénétration de la teinture pour augmenter la durabilité des produits finis et le traitement devra être réalisé rapidement pour réduire les coûts de cette opération.

Objectifs spécifiques :

1. Tester une méthode de traitement utilisant un tube à choc pour teindre du bois franc.
2. Identifier les paramètres clés de cette opération et établir les conditions optimales.
3. Expliquer comment les ondes de choc peuvent influencer l'imprégnation du bois.
4. Tester une deuxième méthode de génération d'ondes de choc et comparer les performances des deux systèmes.
5. Vérifier si un traitement aux ondes de choc affecte la dureté du bois.

1.4 Méthodologie

Afin d'atteindre les objectifs de cette étude, le bois a été étudié sous divers aspects. En fait, il est possible de diviser ce projet en quatre sections principales :

1. Le développement d'un modèle de prédiction de la pénétration.
2. L'étude expérimentale de l'absorption et de la pénétration de teinture dans du bois franc
3. L'analyse des résultats
4. La présentation des résultats

Tout d'abord, un modèle théorique a été développé pour étudier l'influence de différents paramètres sur l'écoulement lors d'un traitement par ondes de choc. Ce modèle servira d'abord à bien orienter l'étude expérimentale, mais aussi pour mieux comprendre comment des ondes de choc peuvent influencer l'imprégnation du bois.

Étant donné la faible durée des ondes de choc, il a été nécessaire de développer un nouveau modèle dynamique de prédiction de la pénétration dans un milieu poreux isotropique. Ce modèle se base sur la loi de Darcy pour quantifier la force visqueuse agissant sur le système. En plus, il considère le comportement non-newtonien de la teinture. Ce modèle a été validé à l'aide de cas extrêmes. Il a ensuite permis de relier la pénétration aux caractéristiques du choc (nombre de Mach, durée), du liquide (densité, viscosité, vitesse du son, impédance) et du bois (perméabilité). Cependant, ce modèle est valide pour un milieu poreux simple. Il ne pourra pas être utilisé pour calculer la pénétration dans le bois, mais les résultats qualitatifs obtenus pour les différents paramètres seront tout de même utiles. Ces résultats seront comparés avec ceux provenant des essais expérimentaux, ce qui permettra d'obtenir une meilleure idée du comportement du bois soumis à des ondes de choc. Le modèle ainsi que les résultats seront présentés au chapitre 3.

Ensuite, différents essais d'imprégnation ont été réalisés pour définir les paramètres clés du système. En plus, ces expériences auront permis de développer une procédure expérimentale qui s'est avérée critique dans la réussite de ce projet. Effectivement, tout au long du processus, l'auteur a dû travailler avec un matériau méconnu et très complexe : le bois. En effet, le bois est un matériau hétérogène dont les propriétés varient beaucoup d'un échantillon à l'autre. Afin d'obtenir des résultats utilisables, cette variabilité a été contrôlée par une préparation adéquate des échantillons et par l'utilisation de l'analyse de la variance. La procédure développée est d'ailleurs une avancée en soi pour le laboratoire et pourra être utilisée pour des tests subséquents. Cependant, certains paramètres inconnus ont encore un effet important sur le traitement et devront être contrôlés pour pouvoir commercialiser le procédé.

En plus de la préparation des échantillons, de nouvelles procédures de mesure ont été développées. Au départ, les tests de pénétrations étaient réalisés au CRIQ (Centre de Recherche Industrielle du Québec) à Québec. Cependant, il était beaucoup plus pratique de faire l'ensemble des tests à Sherbrooke. Une nouvelle méthode pour mesurer la pénétration a donc été développée. La mesure de la dureté a également nécessité des nouveautés. Une norme existe pour mesurer la dureté du bois [ISO3350-1975], mais elle était inapplicable à ce projet. Les échantillons étaient trop petits et la pénétration du poinçon était trop importante, ce qui ne permettait pas de mesurer la dureté superficielle.

Les tests d'imprégnations ont été réalisés sur deux montages différents. Tout d'abord, un canon à onde de choc vertical a permis de reproduire les conditions utilisées par RAO et coll. [2005] pour traiter le bambou. Quelques tests ont également été réalisés à l'aide d'un cylindre pressurisé et d'un générateur électronique pour tenter de quantifier l'effet de la pression statique et d'ondes de faible durée. Une technique de modification du bois utilisant des micro-ondes développée par TORGOVNIKOV et VINDEN [2002] a également été examinée pour tenter d'augmenter la pénétration.

Finalement, tous les résultats obtenus ont été analysés à l'aide de plans d'expériences factoriels et de l'analyse de la variance. Pour ce faire, le logiciel Design-Expert a été d'un grand secours. En utilisant ces méthodes statistiques, il a été possible de tirer des conclusions concernant l'effet du choc malgré la grande variabilité des résultats. Les résultats seront ensuite présentés dans ce mémoire et par le biais d'un séminaire public.

Chapitre 2

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Le bois en tant que milieu poreux

Le bois est un matériau multiphase. Effectivement, en plus d'une matrice solide, une grande partie de son volume est occupée par une phase liquide ou gazeuse. Il appartient à la catégorie des matériaux poreux.

Plus formellement, un milieu poreux est un milieu pour lequel :

1. Une portion de l'espace occupée par une matière hétérogène et multiphase. Ce milieu comporte au moins une phase solide (la matrice) et une phase liquide ou gazeuse occupant l'espace libre (les pores) [BEAR, 1972].
2. La phase solide doit être distribuée dans l'espace occupé par le milieu poreux. Ainsi, le milieu solide doit être présent en quantité suffisante dans chaque élément de volume élémentaire (c'est-à-dire un volume suffisamment grand par rapport à la taille des pores). Le diamètre des pores doit également être relativement petit [BEAR, 1972].

De plus, dans certains matériaux poreux, les pores sont interreliés : ils forment un réseau de canaux qui permettent un écoulement visqueux entre deux faces opposées. Ce sont des milieux poreux perméables [DULLIEN, 1992]. Le bois fait partie de cette catégorie et c'est sa perméabilité qui rend son imprégnation possible.

2.1.1 Caractéristiques macroscopiques des milieux poreux

Les milieux poreux peuvent être caractérisés selon deux échelles différentes : l'échelle macroscopique (continuum poreux) et l'échelle microscopique. L'échelle macroscopique est définie pour ces matériaux comme étant la dimension où plusieurs échantillons similaires d'un même matériau possèdent la même perméabilité. On dit que l'échantillon est statistiquement homogène pour ces dimensions. À l'échelle sous-macroscopique, l'hétérogénéité du matériau causé par les variations dans la microstructure entraînera une variation spatiale des propriétés [DULLIEN, 1992].

Dans cette section, une attention particulière sera portée aux caractéristiques macroscopiques des milieux poreux. Effectivement, bien qu'il soit possible en théorie de déterminer les propriétés de ces milieux à partir des caractéristiques du réseau de pores [DULLIEN, 1992], les modèles actuels décrivant les écoulements et la propagation d'onde dans un milieu poreux utilisent l'approche du continuum poreux ou des volumes représentatifs élémentaires [SOREK et coll., 1999].

Porosité

Pour commencer, la porosité (n), ou porosité volumétrique, c'est le ratio volumique des pores (*void*) U_v par rapport à l'ensemble (*bulk*) U_b tel que représenté à l'équation (2.1) avec U_s le volume occupé par la matrice solide [BEAR, 1972; DULLIEN, 1992].

$$n = \frac{U_v}{U_b} = \frac{(1 - U_s)}{U_b} \quad (2.1)$$

La porosité effective est calculée de la même manière, mais en utilisant seulement le volume des pores interconnectés, donc les pores contribuant à l'écoulement au travers de l'échantillon [BEAR, 1972].

La porosité du bois peut varier grandement d'une espèce à l'autre. Ainsi, le balsa a une porosité de 0,96 en moyenne, alors que certains bois tropicaux à très haute densité peuvent avoir une porosité de 0,3. Les bois mous typiquement utilisés en construction ont une porosité d'environ 0,65 [SIAU, 1989].

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer la porosité [BEAR, 1972; DULLIEN, 1992]. Dans le cas du bois, une manière très simple est de comparer la densité d'un échantillon de bois

parfaitement secs avec la densité des fibres. La densité des fibres (ρ_s) varie peu d'une espèce à l'autre et est d'environ 1,50 g/cm³ [TSOUMIS, 1991]. Ainsi, le volume de vide dans le bois peut-être calculé avec l'équation (2.2) :

$$U_v = \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_s}\right) \quad (2.2)$$

avec ρ_0 la densité du bois (séché au four¹) [TSOUMIS, 1991].

Perméabilité

La perméabilité, c'est une mesure de la facilité avec laquelle un fluide peut traverser un milieu poreux comme le bois [HANSMANN, 2002]. Elle est déterminée en mesurant le débit de fluide passant au travers d'un échantillon pour un gradient de pression donné. Dans le cas du bois, il a été démontré qu'en prenant les précautions nécessaires, la perméabilité mesurée pour un liquide hydrophobe (comme un solvant organique) est égale à la perméabilité mesurée pour un gaz [SIAU, 1989]. La loi de Darcy (2.3) permet de relier le débit à la perméabilité pour un écoulement à une dimension (1D) à faible débit en régime permanent [DULLIEN, 1992].

$$k = Q \cdot \frac{L \cdot \mu}{A \cdot \Delta P} \quad (2.3)$$

avec k la perméabilité (m²), Q le débit volumique de fluide (m³/s), L et A la longueur et la section du spécimen, ΔP le différentiel de pression et μ la viscosité dynamique du fluide [BEAR, 1972; DULLIEN, 1992; HANSMANN, 2002].

La perméabilité du bois est anisotropique, c'est-à-dire qu'elle varie en fonction de la direction de propagation. Cette propriété varie également beaucoup entre les différentes essences de bois, mais également entre deux sections d'une même espèce. Ainsi, le ratio de perméabilité entre les espèces les moins perméables (essences réfractaires) et les plus perméables est d'environ 1 000 000 pour 1 dans une direction donnée [SIAU, 1989; NAIR et SIMONSEN, 1995]. Davantage d'explications sur ces variations seront fournies au moment d'aborder la microstructure du bois à la section 2.2.

¹Séché dans un four maintenu à $103 \pm 20^\circ\text{C}$ pendant 12-48 heures pour un spécimen de 100 g. Après le séchage, l'humidité restante est d'environ 0,5% [TSOUMIS, 1991]

Pour un chargement dynamique, la perméabilité sera différente. JOHNSON et coll. [1987] ont montré que la perméabilité diminue avec la fréquence. De plus, ZEISER et coll. [2008] ont trouvé que la perméabilité diminue avec le nombre de Reynolds. Cependant, aucune étude sur la perméabilité dynamique du bois n'a été trouvée à ce jour.

Mouillabilité

Lorsque deux fluides sont en contact, une force appelée la tension de surface vient modifier l'équilibre des pressions à l'interface. L'interface prend alors la forme d'un dôme. Pour obtenir un équilibre statique, la pression de chacun des fluides ne sera pas identique. Une pression plus élevée sera nécessaire du côté concave du dôme pour le maintenir en place et vaincre la tension de surface [DULLIEN, 1992].

Le même phénomène se produit quand un fluide est en contact avec un solide. Or, la rigidité des solides est telle qu'il est difficile d'observer une déformation. L'effet est donc seulement apparent lorsque le solide est en contact avec deux fluides. Dans ce cas, un des fluides sera davantage attiré par la surface et s'y retrouvera en préférence à l'autre fluide en présence. On appelle cette propriété la mouillabilité d'une surface à un fluide donné par rapport à un autre fluide. Par exemple, il serait possible de mesurer la mouillabilité du bois à la teinture par rapport à l'air ambiant ou par rapport à l'eau. Tel que l'illustre la figure 2.1, la mesure de la mouillabilité est l'angle de contact par rapport à la surface [DULLIEN, 1992].

Pour un écoulement, l'effet de la mouillabilité est seulement présent près des parois. Cet effet est négligeable dans des conduites de grandes dimensions, mais il est important dans des conduites capillaires (comme les pores). En fait, il faudra appliquer une pression extérieure

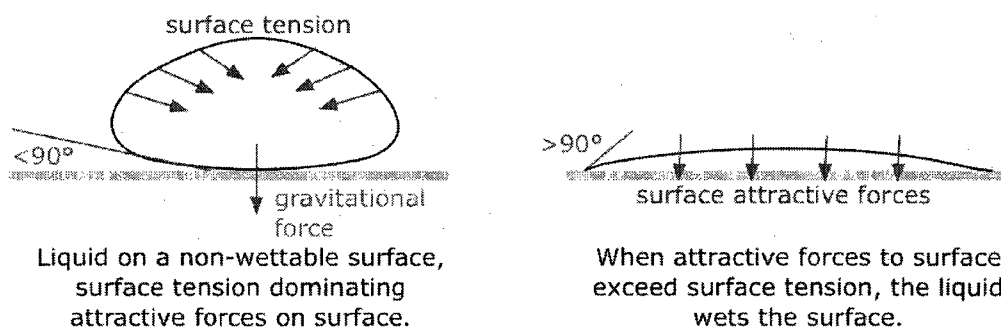


FIG. 2.1: Effet de la mouillabilité d'une surface [LOWER, 2007]

pour faire pénétrer un fluide ayant une faible mouillabilité par rapport au fluide à déplacer (processus appelé drainage) alors que le mouvement inverse (imbibition) peut se faire de manière spontanée alors que les deux fluides sont à la même pression. Dans le premier cas, la tension de surface s'oppose à l'avance du fluide alors que, dans le second cas, la tension de surface contribue à l'avance du fluide ayant la plus forte interaction avec la surface solide [DULLIEN, 1992].

Dans le cas du bois, l'effet de la tension de surface variera beaucoup selon le liquide utilisé et même à l'intérieur de la microstructure (voir la section 2.2.1 pour plus de détail). MEIJER et coll. [2001] ont mesuré l'évolution temporelle de l'angle de contact pour différentes substances. Certaines substances mouillent complètement le solide, alors que d'autres ont un angle de contact de plus de 90°. Cependant, la viscosité a également un rôle à jouer dans cette mesure, la pénétration du liquide faisant varier l'angle de contact. Ainsi, pour une substance de faible viscosité, la tension de surface aura une importance plus faible. Cependant, peu importe la substance étudiée, MEIJER et coll. [2001] affirment que la tension de surface a seulement un effet mineur sur la pénétration des composés étudiés.

2.1.2 Modélisation d'un écoulement dans le bois : état actuel

Deux phénomènes régissent le transport d'un fluide dans un milieu poreux : la diffusion et l'écoulement du fluide dans le réseau capillaire.

Tout d'abord, la diffusion est le mouvement d'une substance dans un milieu dans la direction d'un gradient de concentration. Elle peut-être de deux natures : diffusion entre deux gaz ou diffusion en présence d'eau (relié au mouvement de l'humidité dans le bois) [HANSMANN, 2002]. Peu importe le type, la diffusion obéit à la loi de Fick (2.4) :

$$F = -D \cdot \frac{dC}{dX} \quad (2.4)$$

avec F le débit moléculaire, D le coefficient de diffusion des deux substances en jeu et C la concentration de la substance se diffusant dans le bois [HANSMANN, 2002; INCROPERA et DEWITT, 2002]. La diffusion dépend surtout de la nature du bois (microstructure, résine, taux d'humidité, etc.) et de la nature de la teinture (solubilité, polarité, etc.). Ce mode d'absorption est cependant très lent et n'a donc pas vraiment d'intérêt économique [BORGIN et CORBETT, 1970]. Il n'en sera donc plus question dans cette section.

Ainsi, la pénétration d'un liquide dans le bois par un processus industriel se fera par le biais d'un écoulement dans le réseau capillaire. La méthode la plus utilisée pour prédire l'écoulement d'un liquide dans le bois est la loi de Darcy unidimensionnelle (2.5) :

$$x = \sqrt{2 \cdot \frac{K}{n} \cdot \frac{\Delta P}{\mu} \cdot t} \quad (2.5)$$

avec x la pénétration, K la perméabilité spécifique, n la porosité, ΔP le différentiel de pression, μ la viscosité dynamique et t la durée du traitement [SIAU, 1984; NAIR et SIMONSEN, 1995]. Cette équation est cependant soumise à de sévères restrictions :

1. L'écoulement doit être visqueux et linéaire. La vitesse du fluide est alors directement proportionnelle au gradient de pression, ce qui est vrai généralement pour une faible vitesse de déplacement [SIAU, 1989; HANSMANN, 2002]. Pour des vitesses plus élevées, la perméabilité diminue. Il est possible de modéliser cette variation en intégrant un facteur quadratique à la loi de Darcy : le facteur de Forchheimer [SOREK et coll., 1999].
2. Le fluide doit être homogène et incompressible [SIAU, 1989; HANSMANN, 2002].
3. Le milieu poreux doit être homogène [SIAU, 1989; HANSMANN, 2002].
4. Le milieu poreux ne doit pas interagir avec le fluide [SIAU, 1989; HANSMANN, 2002].
5. La perméabilité doit être indépendante des dimensions du milieu poreux. [SIAU, 1989].

De plus, l'équation (2.5) néglige la tension de surface et suppose que la pression initiale est nulle, ce qui correspond au cas où l'air serait retiré de l'échantillon avant le traitement (procédé de Bethell) [SIAU, 1984].

La plupart des chercheurs s'entendent pour dire que la loi de Darcy est applicable aux écoulements dans le bois sous l'effet d'un gradient de pression variant peu avec le temps, et ce même si les écoulements dans le bois ne respectent pas toujours les hypothèses soutenant cette loi :

1. La perméabilité du bois varie entre différentes sections d'un même échantillon pour une direction donnée. À cause de cela, la loi de Darcy ne donne pas de résultats satisfaisants pour les écoulements en régime transitoire, sauf si l'échantillon étudié est séparé en plusieurs zones de perméabilité différente [SIAU, 1989].

2. Des pores peuvent être obstrués par des particules, par les membranes des punctuations ou par des bulles d'air, ce qui modifie localement la perméabilité [SIAU, 1989; HANSMANN, 2002].
3. Il y a parfois du glissement ou des turbulences dans l'écoulement. De plus, la compressibilité du fluide n'est pas toujours négligeable [HANSMANN, 2002].
4. Le fluide circulant dans le bois n'est pas toujours homogène. Par exemple, la présence de particules en suspension, comme par exemple les pigments dans la teinture, affectent l'écoulement. " *The viscosity of the unpigmented binder solution was hardly influenced by the applied shear rate. The pigmented coatings, however, showed a strong non-Newtonian behaviour [...]* " [MEIJER et coll., 2001]. Les enduits pigmentés possèdent un comportement rhéofluidifiant (c'est-à-dire que la viscosité diminue avec une augmentation de la contrainte de cisaillement) [MEIJER et coll., 2001], ce qui est identique au comportement observé généralement pour les suspensions de particules anisodiamétriques [WOLFF et DUPUIS, 1994]. D'autres suspensions de particules utilisées pour le traitement du bois, dont les émulsions, sont donc susceptibles d'être également des fluides non newtoniens.
5. L'eau crée des ponts hydrogène avec la structure du bois. Ainsi, le fluide peu interagir avec le milieu dans certaines situations, ce qui se traduit dans ce cas par une plus faible pénétration dans le bois des produits à base d'eau comparativement aux produits à base d'huile de même viscosité [SIAU, 1989].
6. Finalement, le différentiel de pression peut varier avec le temps et les effets transitoires pourraient être importants dans certaines applications. Ça sera particulièrement vrai pour un traitement à l'aide d'une onde de choc. Dans ce cas, la pression et la vitesse du fluide seront amenées à changer brusquement à la suite de la réflexion de l'onde sur la surface du bois et la pénétration en régime transitoire sera importante. Dans ces cas, il faut s'attendre à ce que la densité du fluide ait un rôle à jouer sur la pénétration.

Pour contourner ces difficultés, d'autres modèles ont été développés au fil des ans. Plus particulièrement, des chercheurs israéliens ont beaucoup travaillé au cours des 15 dernières années sur la propagation et la réflexion des ondes de choc dans les milieux poreux (voir figure 2.2) [LEVY et coll., 1993; LI et coll., 1995; SOREK et coll., 1999; MALAMUD et coll., 2003; TORRENS et WROBEL, 2003]. Le modèles qu'ils ont développé a fait l'objet de plusieurs études. Il semble donc le mieux accepté de nos jours. Cependant, ce modèle est difficilement applicable à ce projet, car les équations différentielles sont très complexes et que plusieurs propriétés du bois (perméabilité, tortuosité) sont difficilement mesurables.

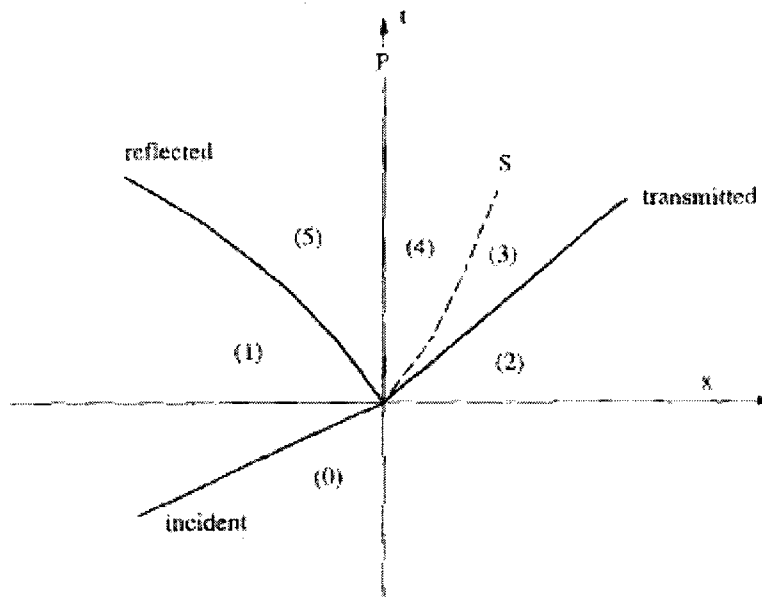


FIG. 2.2: Diagramme $x-t$ de la réflexion d'un choc sur un milieu poreux. La substance au dessus du milieu poreux passe de l'état 0 à l'état 1 avec le choc incident, puis à l'état 5 après le passage du choc réfléchi. À l'intérieur du milieu poreux, le fluide présent initialement passe de l'état 2 à l'état 3 à la suite du passage du choc transmis. Il est séparé du fluide pénétrant dans le milieu (4) par la surface de contact S . Cette surface de contact décélère parce que le fluide est ralenti par le frottement visqueux. Les ondes de compression générées iront rejoindre le choc réfléchi, ce qui explique pourquoi le choc réfléchi devient plus puissant avec le temps. [LI et coll., 1995]

Le dernier point très intéressant à remarquer concernant les écoulements dans le bois, c'est la variation de la pression interne à l'intérieur de l'échantillon suivant l'avance graduelle du fluide traitant dans le bois. La figure 2.3 montre un exemple de courbe de pression pouvant être obtenue pour un capteur placé à l'intérieur du bois. On y remarque qu'il y a un retard substantiel entre l'application de la pression externe et l'atteinte d'un plateau de pression. Le temps requis pour obtenir cet équilibre dépend principalement de la viscosité du fluide utilisé et de la perméabilité du bois à traiter. Quand cet équilibre est atteint, c'est que le fluide traitant ne peut pas avancer davantage dans le bois [SCHNEIDER et coll., 2003]. Tel que l'on peut le constater à la figure 2.4, il est possible d'observer un phénomène similaire à la suite du passage d'une onde de choc dans un milieu poreux plus perméable que le bois et saturé d'air, mais sur une échelle de temps beaucoup plus courte [LEVY et coll., 1993]. La figure 2.4 montre d'ailleurs un comportement très similaire à ceux obtenus à Sherbrooke dans un petit tube à choc (5,3 mm de diamètre) [BROUILLETTE, 2003], montrant que l'affaissement de la discontinuité de pression et l'augmentation de la pression maximale sont

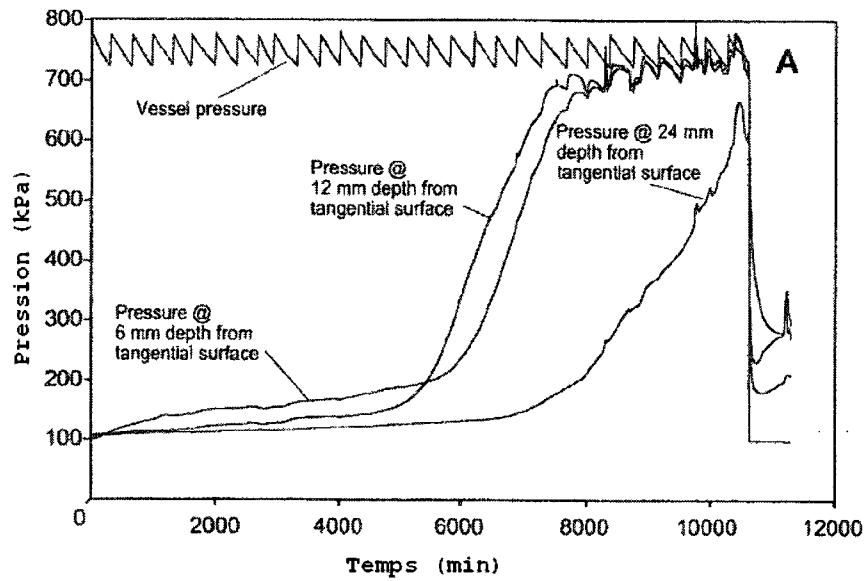


FIG. 2.3: Évolution temporelle de la pression à l'intérieur d'un échantillon de bois traité avec de l'huile par le procédé de Bethell. Le temps 0 correspond au moment où la pression est appliquée. [SCHNEIDER et coll., 2003]

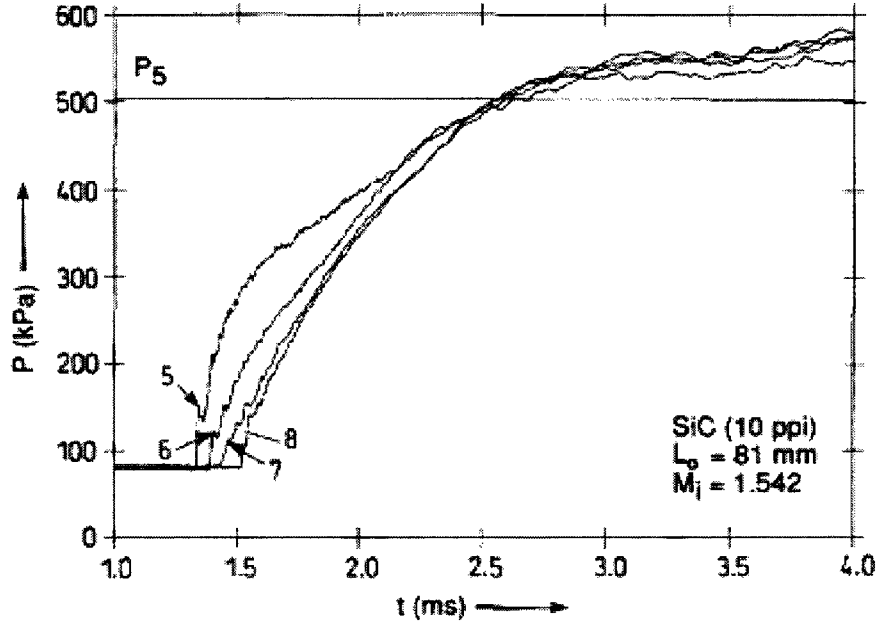


FIG. 2.4: Évolution temporelle de la pression du gaz des pores d'un milieu poreux à différentes profondeurs à la suite de la réflexion d'un choc normal à sa surface. Sur la figure, P5 correspond à la pression qui serait obtenue suite à la réflexion d'un choc sur une surface solide et les autres numéros indiquent le capteur par ordre croissant de profondeur dans l'échantillon, 5 étant celui situé le plus près de la surface. [LEVY et coll., 1993]

probablement dûs au frottement visqueux avec la paroi.

Lorsque la pression externe sera retirée à la fin du traitement, la pression à l'intérieur de l'échantillon variera également avec le temps. De plus, cette pression restera supérieure à la pression atmosphérique si la pièce de bois n'est pas placée sous vide. Cette pression résiduelle est représentative des obstacles que rencontre le fluide et est inversement proportionnelle à la perméabilité du bois. Si elle n'est pas contrôlée correctement, cette pression peut repousser le fluide, dont les biocides, à l'extérieur du bois, créant un dépôt invisible à la surface. Ce dépôt peut représenter un risque pour toute personne manipulant le bois dans le futur [SCHNEIDER et coll., 2003].

2.2 Caractéristiques anatomiques du bois

Comme indiqué à la section 2.1.1, les modèles décrivant les écoulements dans les milieux poreux utilisent les caractéristiques macroscopiques de ces milieux. Cependant, le bois n'est pas un matériau poreux comme les autres. Le bois a une microstructure extrêmement complexe et variant beaucoup d'un échantillon à l'autre, et ce, même pour deux morceaux de bois provenant d'une même planche. Ces différences dans la microstructure agissent directement sur la perméabilité du bois, ce qui vient affecter l'imprégnation. Une bonne compréhension des éléments anatomiques du bois est donc essentielle.

2.2.1 Microstructure

Le liquide doit se déplacer dans le bois en empruntant le réseau de canaux qui s'est construit naturellement pour faire circuler l'eau et la sève dans l'arbre. Or, ce réseau dépendra beaucoup du type d'arbre utilisé pour produire le bois. Tout d'abord, les gymnospermes (conifères) sont le premier type d'arbre à être apparu dans l'échelle de l'évolution. Leur microstructure est relativement simple. Ces espèces produisent souvent de grandes quantités de résine (d'où leur nom de résineux) et leur bois est habituellement tendre (bois mou). Ensuite, les plantes angiospermes se séparent en deux classes contenant des arbres : les monocotylédones (arbres monocoques) et les dicotylédones (arbres à feuilles caduques). Certains arbres monocoques, comme le bambou ou les palmiers, produisent des quantités appréciables de bois qui peuvent trouver différentes applications. Cependant, cette dernière famille est peu utilisée sous nos latitudes et il n'en sera pas fait mention davantage dans ce mémoire. Finalement, les arbres

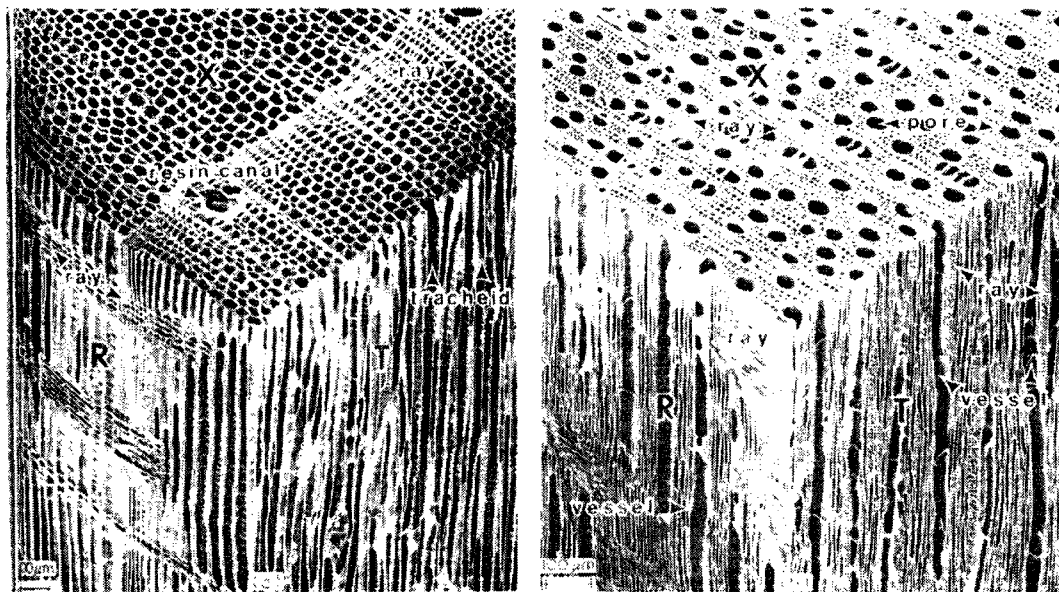


FIG. 2.5: Microstructure d'un bois mou et d'un bois dur à pores diffus. Sur les deux échantillons, les faces principales sont indiqués : transversales (X), radiale (R) et tangentielle (T). [SIAU, 1989]

feuillus produisent la plus grande variété de bois. Leur microstructure est beaucoup plus élaborée : il y a donc davantage de différence entre les espèces. Le bois de feuillu est appelé bois dur, même si le bois produit par certaines espèces de feuillus est plus tendre que celui produit par certains résineux. [HOADLEY, 1990; WALKER et coll., 2005]

Tel qu'il a été indiqué précédemment, les bois mous ont une microstructure relativement simple comparativement aux bois durs. En observant la photo de gauche de la figure 2.5, il est possible de voir les différents éléments microstructuraux des bois mous. Le type de fibre le plus présent dans les bois mous est la trachéide axiale, qui représentent plus de 90 % du volume [TSOUMIS, 1991]. Ce sont de longues fibres carrées (ou rectangulaire) servant en même temps au transport des fluides (dans l'espace libre à l'intérieur appelé lumière) et au soutien de l'arbre. C'est d'ailleurs la principale voie de pénétration axiale dans les bois mous [HANSMANN, 2002]. Typiquement, elles ont une longueur variant entre 3 et 5 mm et leur diamètre varie entre 15 et 80 μm . Elles sont fermées à leurs extrémités [TSOUMIS, 1991].

Un autre type de conduit permet de faire circuler un fluide dans la direction axiale : les canaux de résines. Ces canaux se retrouvent presque uniquement chez les conifères et prennent la forme de grandes ouvertures circulaires [MEYLAN et BUTTERFIELD, 1972; TSOUMIS, 1991]. Cependant, malgré leur grande taille, les canaux de résines longitudinaux jouent un rôle secondaire dans les écoulements axiaux [HANSMANN, 2002], même que la présence de

résine peut grandement réduire la perméabilité [STAMM, 1973].

Dans les bois durs, le transport des liquides dans la direction axiale et le soutien de l'arbre sont assurés par deux types de cellules différentes : les vaisseaux et les fibres. Ces deux types de cellules sont d'ailleurs présents uniquement dans les bois durs. Les vaisseaux sont en fait une longue série de cellules ouvertes à leurs extrémités et mises bout à bout, formant un tube pour conduire le liquide. Les éléments de vaisseaux sont connectés les uns aux autres par les plaques de perforations, qui sont en fait ce qui reste des parois aux extrémités des cellules. La dimension des vaisseaux varie énormément, même au sein du même arbre. Leur longueur varie entre 0,2 et 1,3 mm et leur diamètre peut passer de 5 à 500 μm . Les fibres, pour leur part, ressemblent un peu aux trachéides formées en fin de saison dans les bois mous. Elles ont une longueur variant entre 1 et 2 mm et un diamètre de 10 à 50 μm et sont fermés à leurs extrémités. Elles forment environ 50 % du volume des bois durs. [TSOUMIS, 1991]

Ensuite, comme il est possible de le constater à la figure 2.5, il n'y a pas que des cellules orientées axialement dans les arbres. Certaines cellules sont orientées radialement et forment des regroupements appelés rayons. Dans les bois durs, les rayons sont formés uniquement de parenchymes radiaux. Ces cellules servent de réserve alimentaire au reste de l'arbre. Elles sont généralement prismatiques et apparaissent généralement pleines de matière. Ce sont des cellules assez petites (0,1 à 0,22 mm de longueur, 10 à 50 μm de diamètre). Elles forment entre 5 et 30% du volume dans les bois durs. Dans les bois mous, les rayons forment entre 5 et 10% du volume, mais on retrouve parfois des canaux de résines et des trachéides radiales en plus des parenchymes [TSOUMIS, 1991]. Pour ce qui est de l'imprégnation du bois, les rayons sont une voie de pénétration importante pour les bois mous dans la direction radiale. Toutefois, l'effet des rayons est plus variable pour les bois durs. Le choix de l'essence de bois est donc primordial [HANSMANN, 2002].

Finalement, pour pouvoir passer d'une cellule à l'autre dans le bois, le liquide doit passer par de très petites ouvertures appelées ponctuations (voir figure 2.6). Les ponctuations se retrouvent dans tous les types de bois, mais leur taille, leur forme, leur disposition et leur dimension varient grandement d'une espèce à l'autre. Il est quand même possible de classer les ponctuations en deux catégories : les ponctuations simples et les ponctuations auréolées, venant généralement en paire. Les ponctuations simples ont un diamètre constant, alors que la cavité des ponctuations auréolées est recouverte par une arche (voir la figure 2.7). Tous les types de ponctuations sont fermés par une membrane. Les membranes sont simples, sauf pour les membranes des ponctuations auréolées des bois mous. Ces dernières possèdent une section centrale rigide appelée le torus qui peut se refermer sur les parois, bloquant presque

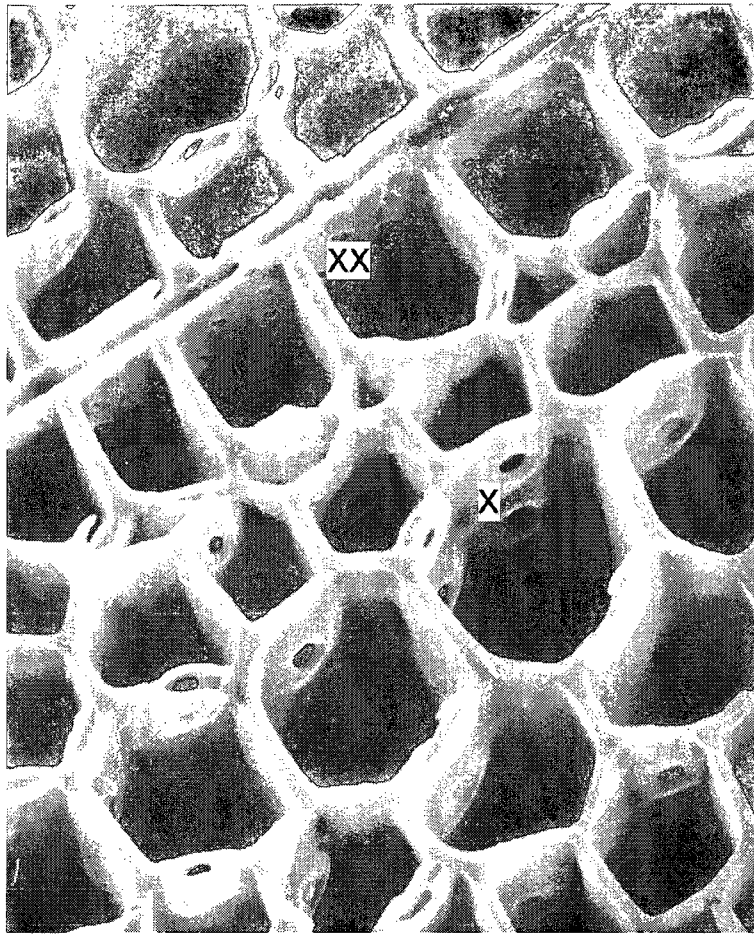


FIG. 2.6: Vue tridimensionnelle au MEB d'un échantillon d'épinette. Il est possible de remarquer les ponctuations auréolées entre les trachéides (X) et les ponctuations semi-auréolées entre les trachéides et les parenchymes radiaux(XX)[TSOUMIS, 1991]

complètement le passage des liquides. Ce phénomène est appelé aspiration. Il est généralement irréversible et il réduit grandement la perméabilité [TSOUMIS, 1991; HANSMANN, 2002].

Les ponctuations sont très petites et, en plus, le liquide doit passer entre les fibres des membranes pour pouvoir les traverser. Leur diamètre effectif est donc très faible. Les ponctuations non aspirées des bois mous ont un diamètre effectif variant entre 0,02 et 4 μm . Pour les bois durs, le diamètre effectif est encore plus faible (entre 5 et 170 nm) [HANSMANN, 2002]. Or, pour expliquer comment le liquide peut passer à travers ces ouvertures, OLSSON et coll. [2001] a émis l'hypothèse qu'un écoulement visqueux endommage la membrane des ponctuations et la paroi des cellules, créant de nouvelles ouvertures qui permettent le passage des liquides. Cette hypothèse semble être confirmée par ses observations au microscope élec-

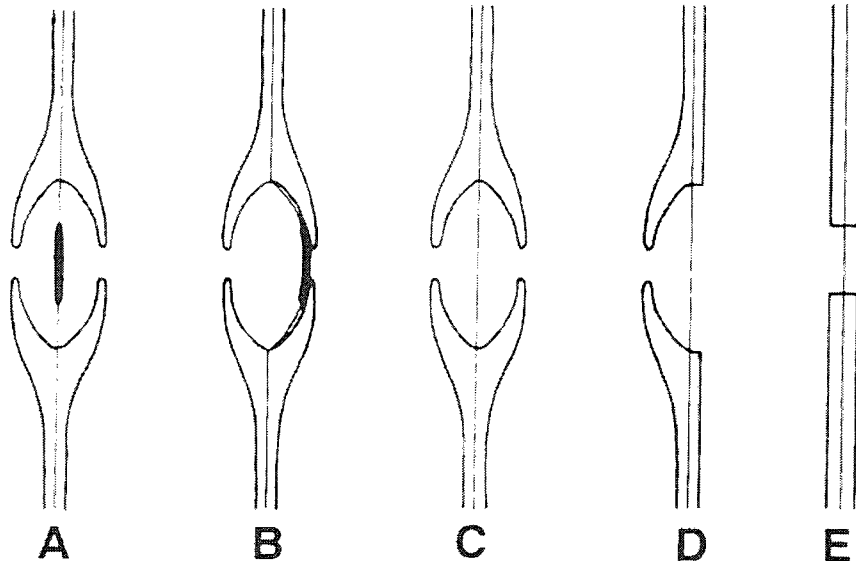


FIG. 2.7: Différents types de ponctuations dans le bois. En A, ponctuations auréolées dans un bois mou (la partie centrale de la membrane est plus épaisse, ce qui est appelé le torus). En B, le torus vient bloquer l'ouverture de la ponctuation, ce qui vient bloquer les écoulements de liquide. En C, ponctuations auréolées dans un bois dur. En D, ponctuations semi-auréolées et (E) simple. [TSOUMIS, 1991]

tronique à balayage. MARCOK et KURJATKO [1996] ont avancé la même hypothèse pour expliquer la pénétration accrue de créosote dans le bois en utilisant des ultrasons.

Certains chercheurs ont poussé encore plus loin cette réflexion : ils ont inventé des procédés permettant d'augmenter la perméabilité du bois en brisant certains éléments de la microstructure. Tout d'abord, HANSMANN [2002] présente certains procédés classiques permettant d'augmenter la perméabilité : l'étuvage et le stockage en bassin. Dans les deux cas, il est maintenant démontré que l'augmentation de la perméabilité du bois est dû à un endommagement de la microstructure et, dans une moindre mesure, à l'extraction de certaines substances hydrosolubles. L'endommagement de la microstructure est dû à la pression dans le cas de l'étuvage [TORGOVNIKOV et VINDEN, 2002] et à la dégradation biologique dans le cas du stockage en bassin [HANSMANN, 2002].

Ces deux méthodes ont cependant comme principal inconvénient la durée requise du traitement. Certains chercheurs ont essayé d'obtenir des procédés plus rapide et plus efficace. Tout d'abord, ITOH et coll. [1998, 2001] ont observé une augmentation significative de la perméabilité des bois de sugi et de karamatsu (deux espèces difficiles à traiter et à sécher) en générant des ondes de choc à l'aide d'explosions sous-marines qui endommagent les membranes des ponctuations auréolées. Ensuite, TORGOVNIKOV et VINDEN [2002, 2004] utilisent des

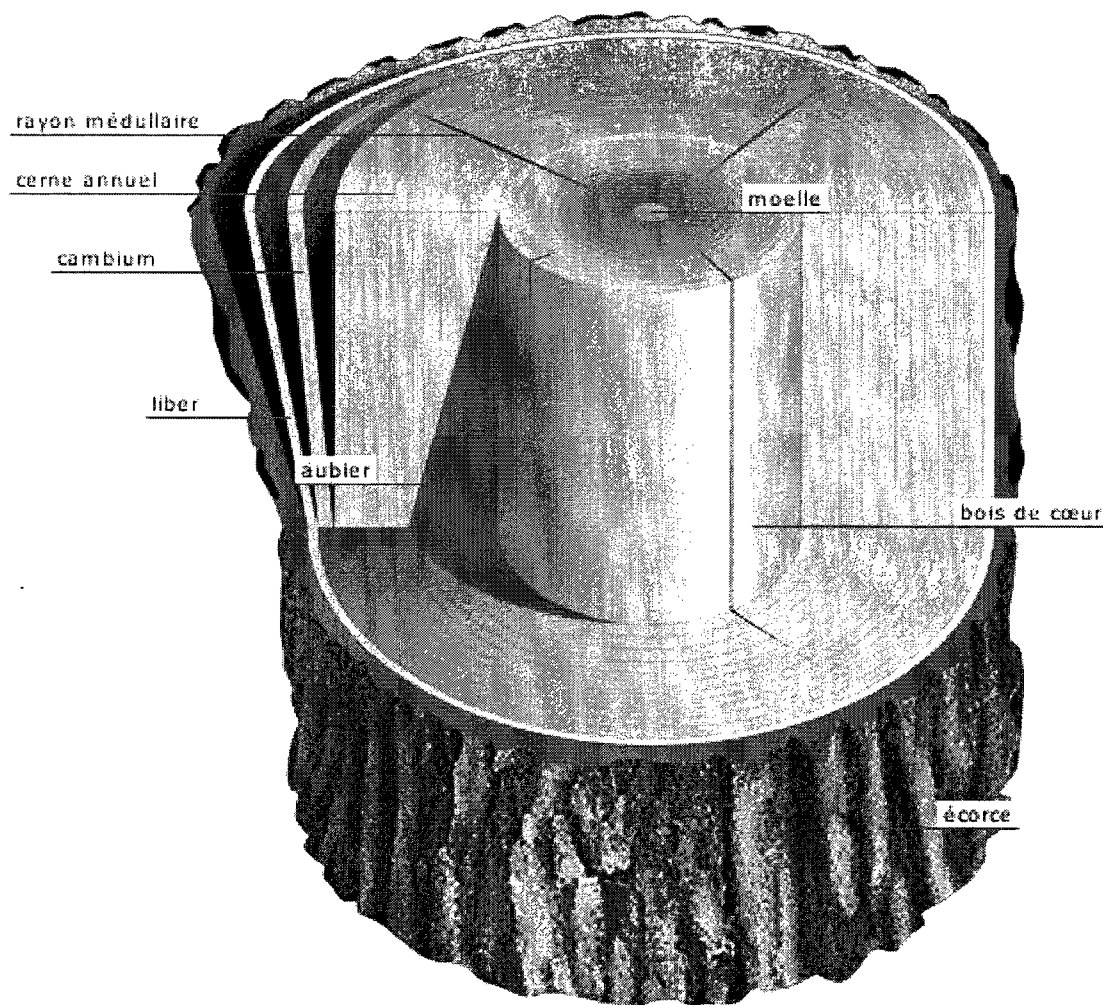
micro-ondes pour évaporer rapidement l'eau contenue dans le bois vert, ce qui permet d'obtenir une pression de vapeur importante à l'intérieur de la microstructure. En choisissant les réglages appropriés, il est possible de briser seulement certains éléments microstructuraux. Ainsi, en brisant la paroi cellulaire plus mince des parenchymes radiaux, il est possible d'augmenter de plusieurs milliers de fois la perméabilité radiale du bois. Cependant, le prix à payer est une diminution des propriétés mécaniques du bois, dont la dureté.

Maintenant que les différents éléments microstructuraux ont été identifiés, le lecteur ne sera pas surpris d'apprendre que la perméabilité du bois est supérieure dans la direction longitudinale (le sens des pores) que transversalement. STAMM [1973] a trouvé que le ratio entre la perméabilité axiale et transversale pour plusieurs espèces de bois durs exempts de tylose est d'environ 30 pour 1. Cependant, la mouillabilité peut également avoir un effet sur l'écoulement d'un liquide dans le bois. Ainsi, la pénétration du solvant selon certains axes sera favorisée selon la nature du solvant utilisé (polaire ou organique). Par exemple, pour un bois mou, NUSSBAUM et coll. [1998] affirment que « *Whereas the pure lignocellulosic longitudinal tracheids may be characterized as highly hydrophilic, the ray cells, which also contain resins and fats, can be described as more hydrophobic* » [NUSSBAUM et coll., 1998].

2.2.2 Zone anatomique sur le bois

La microstructure du bois et sa perméabilité changent entre différentes espèces, mais également au sein du même arbre. Tout d'abord, il y a deux zones principales qu'il est important de différencier dans le bois : l'aubier et le bois de cœur (ou bois parfait) (voir la figure 2.8). L'aubier est le bois physiologiquement actif, plein de nutriment et situé près de l'écorce. C'est cette portion de l'arbre qui sert à conduire la sève et est donc plus perméable. Au début de la vie de l'arbre, tout le bois est de l'aubier. Cependant, au fur et à mesure que le tronc élargi, l'arbre n'a plus besoin de toutes ses cellules pour conduire la sève. Les cellules les plus près de la moëlle meurent et forment le bois de cœur. Leur seule fonction à ce moment est d'assurer le soutien de l'arbre. À la suite de ce changement, les ponctuations se referment, il peut y avoir formation de tylose et de plusieurs produits d'extractions qui donnent souvent une teinte plus foncée au bois de cœur. Tous ces changements réduisent la perméabilité du bois parfait et sa mouillabilité aux liquides aqueux, mais en augmentent la résistance. [HOADLEY, 1990; HANSMANN, 2002]

Ensuite, il est possible de remarquer à la figure 2.8 une autre caractéristique macroscopique importante : les cernes de croissance. Le bois formé pendant la période de croissance s'appelle



© Les Éditions Québec Amérique inc. Illustration tirée du Nouveau Dictionnaire Visuel, www.quebec-amerique.com

FIG. 2.8: Structure macroscopique du bois

bois initial, tandis que le bois formé dans une saison difficile s'appelle bois final. Le bois final forme un anneau assez mince et souvent plus foncé. C'est ce que l'on appelle le cerne de croissance. De plus, les lumières sont généralement plus petites dans le bois final et les parois des cellules sont plus épaisses. Le bois initial sert donc généralement plus au transport de la sève et le bois final sert davantage au maintien de l'arbre. C'est particulièrement vrai pour les bois mous. De plus, les cernes de croissances servent à catégoriser les bois durs en trois catégories : bois à zone poreuse, bois à zone semi-poreuse et bois à pores diffus selon la distribution et la taille des vaisseaux dans le bois initial [MEYLAN et BUTTERFIELD, 1972; HOADLEY, 1990; TSOUMIS, 1991; WALKER et coll., 2005].

2.3 Imprégnation du bois à l'échelle industrielle

2.3.1 Imprégnation : état actuel

Un procédé efficace d'imprégnation du bois se doit d'atteindre deux objectifs [TSOUMIS, 1991] :

1. Permettre à une quantité suffisante de composés de pénétrer dans le bois pour obtenir le résultat désiré (toxicité, couleur, etc).
2. Faire pénétrer le produit en profondeur pour assurer la durabilité du traitement.

Le respect de ces paramètres est particulièrement important dans le cas d'un traitement à l'aide de biocides. La plupart des procédés de traitement ont donc été développés pour la protection du bois contre les attaques biologiques, mais ils peuvent être utilisés également pour appliquer de la teinture ou ses ignifugeants.

Les procédés de traitement sont tous appliqués sur du bois sec, sauf pour les procédés utilisant la diffusion. Outre cette exception, les procédés d'imprégnation se classent en deux catégories principales : les méthodes utilisant une pression statique et celles qui n'en utilisent pas.

Le procédé le plus efficace pour imprégner le bois est le traitement en usine dans des cylindres fermés. Ces traitements se divisent en deux catégories : le traitement à cellule pleine et le traitement à cellule vide [TSOUMIS, 1991]. Ces deux types de cycles de traitement sont montrés à la figure 2.9. Le traitement à cellule pleine, ou procédé de Bethell, est le premier procédé d'imprégnation du bois sous-pression à avoir été inventé. Il consiste à remplir tout l'espace disponible dans les lumières des cellules à l'aide du biocide. Pour ce faire, le bois est placé sous vide dans le cylindre pendant un certain temps pour évacuer l'air qu'il contient avant l'arrivée du biocide. Ensuite, le bois est immergé. Il est soumis à une pression de 7 à 8 atm qui est conservée jusqu'à ce que la quantité désirée de biocide ait pénétré dans le bois. Finalement, le cylindre est vidé de son liquide et un léger vide est appliqué pendant quelques minutes pour prévenir l'épanchement du liquide [TSOUMIS, 1991]. Dans une variation de ce procédé, appelé Vac-Vac, la pression statique est remplacée par la pression atmosphérique et le deuxième vide est plus prononcé que le premier, ce qui est utile pour obtenir une plus faible rétention, mais une pénétration plus profonde [TSOUMIS, 1991].

De nos jours cependant, les traitements à cellules pleines ont laissé place aux traitements à cellules vides pour la plupart des applications. Dans un traitement à cellule vide, seulement

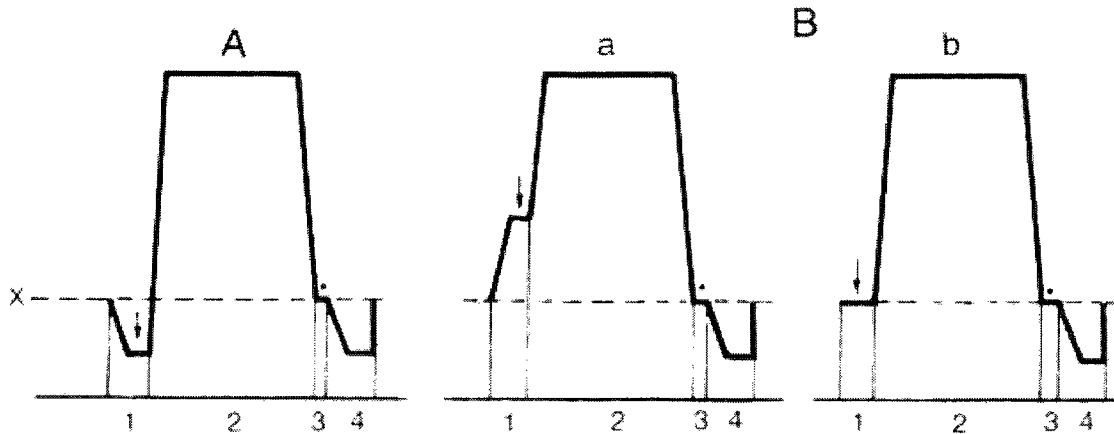


FIG. 2.9: Diagramme des principaux cycles de traitement sous pression. Le A représente le traitement à cellule pleine (procédé de Bethel) et le B les traitements à cellules vides (Rueping (a) et Lowry(b)). Pour tous ces procédés, l'étape 1 représente la pression initiale, la flèche le moment où le cylindre est rempli de liquide, l'étape 2 le cycle de pression, l'étape 3 le relâchement de la pression, le point l'évacuation du liquide et, finalement, l'étape 4 représente le vide final. [TSOUMIS, 1991]

la paroi des cellules est imprégnée, ce qui en fait un traitement plus économique et tout aussi efficace. En terme d'opération, ces procédés sont très similaires au procédé de Bethel, à la différence que le vide initial est remplacé par une trempe à pression atmosphérique (procédé de Lowry) ou par une pression intermédiaire entre la pression atmosphérique et la pression de traitement (procédé de Rueping)[TSOUMIS, 1991].

Ces méthodes comportent cependant plusieurs désavantages. Il faut d'abord conserver le bois pendant plusieurs heures dans des cuves sous pression, ce qui augmente considérablement le coût du traitement. De plus, les températures et pressions élevées appliquées sur le bois pendant ces longues durées endommagent la structure cellulaire et affectent les propriétés mécaniques de certaines essences. Troisièmement, certaines essences de bois ne peuvent pas être traitées avec les procédés actuels. Finalement, l'air emprisonné dans plusieurs régions du réseau capillaire ne peut pas être enlevé par les différentes méthodes appliquant seulement une pression de façon statique [PAGE et REED, 1969; BORGIN et CORBETT, 1970].

Pour ce qui est des procédés n'utilisant pas de pression, ils sont souvent plus économiques, mais aussi moins efficaces. La teinture est généralement appliquée à l'aide d'un de ces procédés. Cette catégorie de traitement comprend tout d'abord l'utilisation d'un applicateur (pinceau ou pulvérisateur) [TSOUMIS, 1991]. La finition des meubles au Québec est le plus souvent effectuée par aspersion à l'aide d'un pistolet à air [CARON, 2006]. Les applicateurs sont également la méthode la plus facilement utilisable pour une application domestique.

Ensuite, l'imprégnation peut également se faire en immergeant le bois dans le produit désiré. L'efficacité de ce genre de traitement dépend des caractéristiques du bois, du liquide et du temps d'immersion, qui peut aller de quelques secondes à quelques semaines dépendamment des caractéristiques recherchées. Il est possible d'accélérer ce procédé en utilisant deux bains successifs. Tout d'abord, le bois est placé dans un bain de liquide à haute température, ce qui permet d'évaporer l'eau résiduelle. De plus, l'air présent dans les cavités prend de l'expansion. Dans le bain froid, l'air se contracte, ce qui crée un léger vide qui attire le liquide vers l'intérieur, augmentant l'efficacité de la trempe tout en demeurant à la pression atmosphérique [TSOUMIS, 1991].

2.3.2 Utilisation d'onde de pression pour le traitement du bois

Plusieurs chercheurs ont déjà tenté d'accélérer le traitement du bois à l'aide d'ondes de pression. Cette section permettra de décrire brièvement les différents essais qui ont déjà été réalisés, les résultats obtenus lors de ces essais et les hypothèses que les auteurs ont avancées pour expliquer l'accélération du traitement.

Ondes soniques de basse fréquence

Cette méthode consiste à soumettre le bois à une oscillation rapide de la pression à une fréquence entre 17 et 30 Hz. Cette oscillation de pression peut remplacer la pression statique [NAIR et SIMONSEN, 1994, 1995] ou y être superposée [PAGE et REED, 1969; BURDELL et BARNETT, 1969]. Il y a quelques ressemblances entre cette technique et la méthode des pressions oscillantes (OPM), déjà utilisée pour l'imprégnation des essences réfractaires [NAIR et SIMONSEN, 1994; FREEMAN et coll., 2003]. Ces deux méthodes se différencient par la période des oscillations. La période est de plusieurs minutes avec la méthode OPM contrairement à quelques millisecondes dans le cas d'un traitement sonique [NAIR et SIMONSEN, 1994].

Les premières expériences sur cette technique ont été réalisées par PAGE et REED [1969]. Leur procédé consiste à immerger le bois dans un cylindre pressurisé. Le cylindre doit être vidé de tout son air, sauf pour l'air emprisonné dans le bois. À la suite de l'application de la pression statique de traitement, des ondes de compression soniques sont générées dans le liquide à l'aide d'un marteau-piqueur modifié. Cette onde doit être caractérisée par une augmentation de pression très rapide et un temps de décroissance beaucoup plus lent. Les auteurs affirment qu'il est important que l'expansion (4) prenne au moins deux fois plus de temps que la compression (3), créant ainsi une onde en dent de scie [PAGE et REED, 1969].

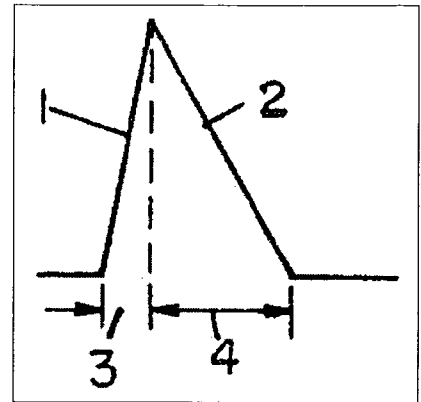


FIG. 2.10: Forme de l'onde de pression utilisée par PAGE et REED [1969]

Les auteurs ont tenté d'expliquer théoriquement ce qui pouvait se produire pendant le traitement. Ainsi, ils avancent l'hypothèse que l'application soudaine de pression pousse la solution à travers les pores et dans les ponctuations. Lors de la détente, après le passage du pic de pression, l'air contenu dans le bois repousse le fluide, mais beaucoup plus lentement. Comme ce mouvement est beaucoup moins brusque, la friction (ou la tension de surface) va empêcher le retour complet du fluide [PAGE et REED, 1969].

BURDELL et BARNETT [1969] présentent une autre explication possible : le liquide se déplaçant rapidement serait pulvérisé par les petites ouvertures des membranes cellulaires. Il se forme alors à ces endroits un mélange air-liquide. Le choc voyage apparemment plus lentement dans le bois que dans le liquide, comprimant le mélange par la suite. Le liquide sera alors éjecté de la cellule, forçant les membranes de la ponctuation à se rouvrir. Après plusieurs répétitions, la marge des membranes sera amenée à se briser, facilitant l'écoulement et empêchant l'aspiration des ponctuations dans le bois mou. Cependant, au fur et à mesure que l'onde pénètre profondément dans le bois, elle perdra de l'intensité et ne sera plus capable de conditionner les membranes des ponctuations.

PAGE et REED [1969] rapportent une réduction du temps de traitement de six heures à une heure en générant des ondes à une fréquence de 17 Hz et la même pression statique que le traitement de référence. Cependant, l'amplitude de l'onde de pression n'est pas connue. Avec le même procédé, mais en utilisant un liquide différent, Burdell et Barnett démontrent que le traitement utilisant des ondes soniques a permis de diviser le temps requis pour

l'imprégnation par 3 ou 4 [NAIR et SIMONSEN, 1995]. Finalement, "*It has been discovered that an increase in the amplitude of the applied energy waves will increase the penetration with each pressure wave, and an increase in frequency at a given level of energy will increase the speed of penetration of the liquid in the wood*" [PAGE et REED, 1969].

Malgré son intérêt pour réduire le temps de traitement, cette technique n'a jamais été étudiée de manière exhaustive et semblait être tombée dans l'oubli jusqu'aux travaux de NAIR et SIMONSEN [1994, 1995]. Ces deux chercheurs ont réalisé de nouvelles expériences en générant des ondes de pression quasi sinusoïdales à 30 Hz à deux niveaux de pression RMS : 0,55 MPa et 0,69 MPa. Ils ont utilisé deux espèces de bois mous à la perméabilité très différentes pour leur test : le pin ponderosa (*pinus ponderosa*) et le sapin de Douglas (*pseudotsuga menziesii*). Après un temps donné, les auteurs remarquent que l'absorption dans le pin ponderosa (essence perméable) augmente de 10 à 20 % par rapport au traitement classique. Pour ce qui est du sapin de Douglas, une espèce réfractaire, l'augmentation est de près de 50 % comparativement aux échantillons traités par une pression hydraulique statique égale à la pression RMS. Il n'a pas été établi si l'amplitude ou la fréquence de l'onde avait un effet significatif sur le traitement pour les pressions étudiées. [NAIR et SIMONSEN, 1995]

Peu importe l'auteur, le principal problème avec cette méthode semble être la présence de bulles d'air dans le liquide.

" When a pocket of air exists within the treating system but exterior to the wood, the applied waveform energy is expended in repeatedly compressing the bubble or pocket of air rather than in forcing the treating solution into the wood. Since air escapes from the wood during the treating of the wood by the application of repetitive shock waves, this air must be flushed from the treating system to permit continuing penetration by the liquid " [PAGE et REED, 1969].

" When bubbles are in cylinder, most of the sonic energy is used in compressing and expanding them. Consequently, even a small volume of bubbles is sufficient to severely retard treatment. This problem will have to be addressed before commercialization of sonic pressure treatment can be assured " [NAIR et SIMONSEN, 1995].

Ultrasons

Plusieurs études ont montré que des ultrasons pouvaient être utilisés pour accélérer l'écoulement d'un fluide dans le bois. Tout d'abord, BORGIN et CORBETT [1970] ont étudié l'effet d'un générateur d'ultrasons de 500 W fonctionnant à 40 kHz sur l'absorption à pression atmosphérique de différents liquides. Selon l'étude, l'efficacité d'un traitement aux ultrasons semble dépendre de plusieurs facteurs, principalement la polarité des composés et la tension de surface. Tout d'abord, l'application d'ultrasons n'affecte pas la pénétration des liquides hydrophobes, alors que les liquides hydrophiles pénètrent plus facilement. L'exception à cette règle concerne l'eau. Dans ce cas, la tension de surface importante rend la formation de bulle plus difficile. Si un surfactant est ajouté à l'eau, son absorption est alors améliorée par l'utilisation d'ultrasons. L'amplitude des ultrasons générés n'a pas été mesurée dans cette étude. .

Durant la même période, MYERS [1970] a breveté un procédé permettant de traiter du bois en continu sur une ligne en utilisant des ultrasons et une pompe à vide. Dans cette installation, un différentiel de pression est créé en faisant circuler le bois dans une colonne de liquide. La pression au niveau inférieur est la pression atmosphérique et une pompe à vide est placée à l'extrémité supérieure de la colonne, créant une dépression. Ce procédé s'apparente ainsi au traitement Vac-Vac décrit à la section 2.3.1.

La figure 2.11 illustre le fonctionnement de ce système. Le bois est traité à sa sortie du séchoir (1) parce que le bois absorbe mieux l'ignifugeant utilisé dans ce cas lorsqu'il contient un faible taux d'humidité (préférentiellement moins de 6 %) [MYERS, 1970]. Après cette étape, le bois (2) est immergé dans le liquide contenu dans un grand bassin ouvert (3). Il est placé à la verticale dans la colonne de liquide (4) s'élevant jusqu'en 5 grâce à une pompe à vide (P). Pendant la montée et la descente de la planche dans la colonne, des ultrasons sont émis vers la surface avec un angle d'environ 45 ° (6). L'angle d'incidence des ondes est choisi afin d'enlever la couche d'air qui se forme à la surface du bois. Les ultrasons font vibrer la surface du bois, créant un mouvement encourageant l'imprégnation, et l'angle de 45 ° permet aux ultrasons d'enlever la couche de bulles qui se forment à la surface du bois. [MYERS, 1970]

Dans ce procédé, une grande importance est accordée à l'évacuation de l'air, et ce, pour deux raisons. Tout d'abord, retirer l'air du bois permet de laisser toute la place au liquide. Ensuite, il se forme rapidement une couche d'air à la surface du bois lors de l'imprégnation. Comme les gaz ont une impédance plus faible que les liquides, la couche d'air agit comme un amortisseur qui réduit de beaucoup l'efficacité des ondes [MYERS, 1970].

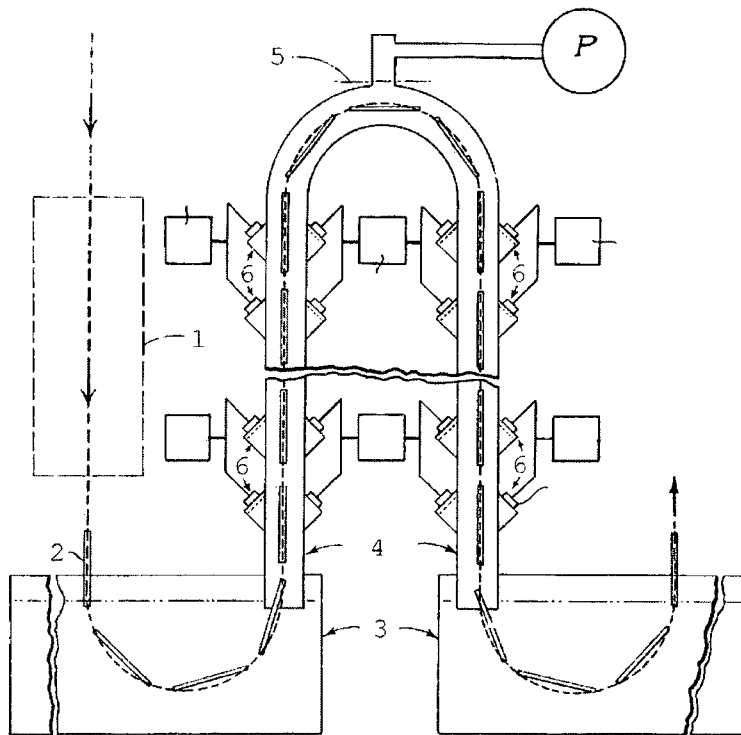


FIG. 2.11: Schéma de l'usine de traitement du bois breveté par MYERS [1970]

Cependant, les bulles d'air pourraient aussi avoir un effet bénéfique. AVRAMIDIS [1988] a étudié l'absorption de CCA à la pression atmosphérique et à température ambiante de trois espèces de conifères de la côte ouest (sapin de Douglas, pin pondéreux et épinette de Sitka). Les résultats obtenus pour des échantillons soumis à des ultrasons de 50-55Hz générés par un nettoyeur ultrasonique de laboratoire ont été comparés aux résultats d'échantillons témoins trempés dans la solution pendant la même période de temps.

AVRAMIDIS [1988] a réussi à bien contrôler la variabilité entre les tests dans cette expérimentation. Pour y arriver, deux couches de résine époxy ont été appliquées sur les faces transversales des échantillons pour limiter la pénétration longitudinale de liquide. De plus, le niveau d'humidité du bois a été contrôlé en le laissant reposer dans une chambre à température et humidité contrôlées. En troisième lieu, pour que le niveau d'humidité ne vienne pas nuire aux pesées, la référence est la masse à sec de l'échantillon. Finalement, chaque combinaison de paramètres a été testée cinq fois.

Après avoir réalisé les tests, une analyse de la variance permet de conclure que l'application d'ultrasons permet une absorption supérieure avec un niveau de confiance variant entre 95 et 99% pour toutes les conditions, excepté pour l'épinette avec un temps d'immersion de

60 minutes. Le gain est plus important pour l'espèce la plus perméable, ce qui peut s'expliquer de deux façons. Tout d'abord, le sapin a été séché à l'air, ce qui réduit l'aspiration des ponctuations. Ainsi, les membranes seraient libres de vibrer, ce qui favoriserait l'imprégnation. L'autre hypothèse avancée est que la cavitation causée par les ultrasons créerait un différentiel de pression suffisant pour créer un écoulement de liquide dans le bois, ce qui expliquerait le gain plus important pour les espèces plus perméables.

Plus récemment, MARCOK et KURJATKO [1996] ont évalué l'effet d'une source surfacique d'ultrasons de 1000 W fonctionnant à 20 kHz sur la pénétration du créosote dans de l'épinette. Ils ont montré que les ultrasons augmentent l'absorption, la surface imprégnée et la pénétration. Les ultrasons ont un effet bénéfique à la pression atmosphérique, mais encore plus quand ils sont utilisés en combinaison avec une pression statique de 0,65 MPa. La plus grande pénétration est obtenue pour une combinaison de pression statique et d'ultrasons. De plus, l'effet des ultrasons est plus grand dans l'aubier que dans le bois de cœur, donc dans la portion la plus perméable. À l'aide d'un microscope électronique à balayage, ils ont aussi démontré que l'action combinée de la pression et des ultrasons semble endommager les microfibrilles de la marge des ponctuations. Le liquide circulerait donc plus facilement dans les ponctuations, ce qui expliquerait la pénétration plus profonde du fluide dans le bois.

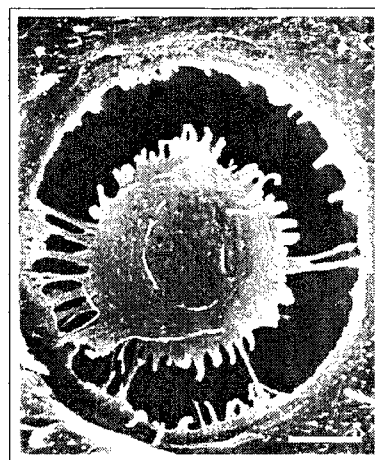


FIG. 2.12: Coupe radiale d'une ponctuation auréolée (*bordered pit*) d'épinette après l'application simultanée d'une pression statique et d'ultrasons. Barre : 3 μm [MARCOK et KURJATKO, 1996]

Tube à choc

En 2002, un article du journal de l'Institut Indien des Sciences présentait plusieurs applications possibles des micro-ondes de choc en biologie. L'injection de biocide dans le bois figure alors parmi les utilisations potentielles [JAGADEESH et TAKAYAMA, 2002]. Depuis, ce temps, l'équipe du professeur Jagadeesh a proposé une nouvelle approche : l'utilisation d'un canon à ondes de choc pour imprégner le bois ou en extraire différentes substances. Selon les articles présentés, cette méthode aurait pour avantage de rendre possible le traitement d'espèces réfractaires (comme le bambou) [RAO et coll., 2005] et d'accélérer le traitement

des essences de bois plus facile à traiter (comme le vatta, utilisé pour la fabrication des crayons à mine) [JAGADEESH, 2005]. De plus, l'onde de choc produite dans un tube à choc peut-être utilisée pour l'extraction de diverses substances, comme l'huile du bois de santal [ARUNKUMAR et coll., 2005].

Pour l'imprégnation du bambou, les échantillons sont immergés dans le biocide avant d'être soumis de manière répétitive (3 fois) à une onde de choc frappant la face transversale et causant une surpression de 3 MPa pendant environ 300 μ s. Le gaz de compression utilisé est de l'hélium et le tube à choc a un diamètre interne de 50 mm. Dans ces conditions, le traitement par onde de choc augmente la rétention du CCA dans le bambou par rapport au traitement sous-pression et à une trempe à chaud du bambou dans une solution de CCA froide. De plus, le temps requis pour imprégner le bambou est de seulement 10 minutes, contrairement aux traitements de références susmentionnés qui nécessitent 3 heures. Finalement, l'absorption des échantillons de bambou soumis à une seule onde de choc est similaire à celle obtenue avec les traitements classiques, ne permettant pas en général une pénétration en profondeur du biocide. Ils ont avancé l'hypothèse que la première onde de choc vient briser la couche externe du bambou, en accroissant la perméabilité. Cependant, des études plus poussées devront être réalisées pour mieux comprendre comment l'onde de choc influence le traitement du bois [RAO et coll., 2005].

Pour sa part, le vatta se traite relativement bien avec les procédés classiques. Cependant, le temps requis pour l'imprégner et le sécher représente 50 % de la durée totale du processus de fabrication. En utilisant un dispositif breveté comprenant deux canons à onde de choc, l'auteur espère pouvoir traiter et sécher le bois en moins d'une heure sans que le traitement modifie son usinabilité [JAGADEESH, 2005]. Toutefois, la recherche en étant encore au stade préliminaire, aucun détail supplémentaire n'est donné sur l'efficacité de la méthode.

Cependant, tel qu'il a été expliqué à la partie 2.1.2, les chocs perdent rapidement en intensité dans un milieu poreux à cause de la viscosité. D'ailleurs, les observations de SCHNEIDER et coll. [2003] viennent remettre en question l'efficacité des méthodes utilisant des variations rapides de pression pour obtenir une pénétration en profondeur du produit.

" The Bethel, Lowry and Ruping processes were all characterized by substantial delays in internal pressure response in the less permeable Douglas-fir. These delays suggest that processes employing relatively rapid changes in pressure will likely have little impact on fluid condition away from the surface [...]. Exposure to higher pressure levels may provide a more fruitful path for improving treatment

providing that the resulting surface-to-interior pressure differentials that develop do not exceed the material properties of the wood [...] " [SCHNEIDER et coll., 2003].

Ces observations semblent confirmer l'hypothèse de BURDELL et BARNETT [1969], qui disait que le choc perdait de son intensité et que, à partir d'une certaine profondeur, le choc ne pouvait plus conditionner les membranes des ponctuations. Ainsi, dans des cas où la perméabilité sera très faible, il est probable que les traitements par onde de choc aient un effet en surface seulement ou à une faible profondeur, bien que la pression importante générée par ces procédés puisse avoir un effet sur d'autres paramètres du problème (réduction de la viscosité des fluides non newtonien, augmentation de la perméabilité, mouvement des membranes, etc).

Chocs sous-marins

Dans le cadre de deux conférences de l'American Society of Mechanical Engineering (ASME), ITOH et coll. [1998, 2001] ont présenté les résultats d'un prétraitement du bois utilisant des ondes de choc sous-marines produites par l'explosion d'un cordeau d'explosif pour en augmenter la perméabilité. Les espèces visées par ce prétraitement sont le sugi et le karamatu. Ces essences sont caractérisées par un bois de cœur beaucoup plus humide que l'aubier. De plus, les membranes des ponctuations du bois de cœur sont aspirées dès la coupe de l'arbre, alors que l'approvisionnement en eau est arrêté. À cause de cela, ces essences sont particulièrement difficiles à sécher et à traiter.

Pour réaliser le traitement, des poutres de bois de section carrée (144 cm²) sont immergées sous l'eau. Ces poutres sont ensuite exposées à des ondes de choc sous-marines (deux répétitions) produites par un cordon d'explosif. Avec deux répétitions et une surpression de 50 MPa, les auteurs notent une accélération du séchage du bois et une réduction du taux d'humidité dans le Sugi et le bois de cœur du Karamatu. Le traitement ne semble pas avoir d'effet sur l'aubier du Karamatu, dont les pores sont déjà ouverts. L'explication avancée est donc que le choc permet d'améliorer la perméabilité du bois en détruisant les membranes des ponctuations. Un choc trop fort endommage le bois et un choc trop faible ne brise pas efficacement les membranes.

2.3.3 Autres avenues prometteuses pour l'imprégnation du bois

L'utilisation d'onde de choc semble une avenue très intéressante pour imprégner le bois. Cependant, il faut être conscient que cette méthode est très récente et que plusieurs autres avenues alternatives s'offrent aux producteurs de bois. Une des plus prometteuses est sans contredit l'utilisation du CO₂ supercritique comme solvant porteur. Un fluide supercritique possède le pouvoir dissolvant d'un liquide et il peut pénétrer la microstructure du bois aussi facilement qu'un gaz. De plus, le CO₂ est économique, non toxique, il est ininflammable et il n'est pas nécessaire de le sécher. Finalement, le CO₂ supercritique est déjà utilisé comme solvant dans l'industrie alimentaire entre autres et une première usine de production de bois traité à l'aide de CO₂ supercritique a été mise en service au Danemark en 2002 [HANSMANN, 2002; EVANS, 2003].

Parmi les autres procédés, le traitement en phase gazeuse à l'aide de triméthyle borate (TMB) semble prometteur, car le bore peut pénétrer plus profondément et plus rapidement dans le bois sous forme de gaz [EVANS, 2003]. De plus, il pourrait être possible d'utiliser cette méthode en combinaison avec une onde de choc. Cependant, ce composé chimique est toxique et inflammable. Son utilisation s'avère donc plus risquée.

Finalement, diverses méthodes de traitement du bois n'utilisant pas de biocide ont été développées ces dernières années. Ces méthodes modifient le bois lui-même par des procédés chimiques ou thermiques. Ces procédés sont tous plus dispendieux qu'un traitement classique, mais ils pourraient trouver leur niche en Europe, où l'utilisation des biocides devrait devenir très encadrée [EVANS, 2003].

Dans cette dernière catégorie, le bois torréfié *Perdure^{MD}* s'avère particulièrement intéressant. Les droits d'exploitations du brevet couvrant ce procédé de torréfaction du bois sont actuellement détenus par la compagnie PCI Industries de la ville de Saguenay [MICHAUD et coll., 2006].

« Le traitement thermique renforce les liaisons moléculaires du bois, ce qui permet d'en améliorer les propriétés physico-mécaniques naturelles. Il provoque la dégradation des éléments nutritionnels du bois tout en limitant de manière significative l'absorption d'humidité, ce qui confère au bois une résistance à la dégradation fongique et aux micro-organismes (à l'exception des termites).

Le traitement *Perdure^MD* modifie aussi le comportement hygroscopique du bois. Une fois que le bois est traité, son niveau d'humidité est compris entre 1 et 3 %

et celui-ci devient hydrophobe. Ceci se solde par une amélioration importante de la stabilité dimensionnelle du bois. Les tests ont également conclu à une bonne résistance du bois Perdure^{MD} à la dégradation fongique, comparable à celle du bois traité chimiquement (CCA). » [MICHAUD et coll., 2006]

Les principaux avantages sont un traitement sans aucune utilisation de produit chimique, une stabilité dimensionnelle accrue, une technologie applicable à toutes les essences de bois et une belle apparence du produit fini, ce qui permet d'améliorer la valeur commerciale d'espèces actuellement peu utilisées. Les inconvénients sont un coût de production plus élevé et une protection inefficace dans des conditions d'humidité permanente (contact avec le sol), contre les termites et les rayons UV [MICHAUD et coll., 2006]. Finalement plus, il est possible d'appliquer un fini sur le bois Perdure^{MD}, mais seulement à l'aide de solvant organique, le bois devenant hydrophobe à la suite du traitement.

Cependant, la plupart de ces méthodes s'occupent davantage de la résistance biologique du bois, sauf le bois Perdure^{MD} qui améliore le fini d'espèces peu utilisées. Il existe tout de même des alternatives aux procédés de finition actuels. Pour l'industrie du meuble, la finition à plat des pièces s'avère une alternative de plus en plus intéressante à la finition de l'assemblage au pistolet à l'air. C'est signe qu'il y a un intérêt grandissant pour des procédés de finition en continu des planches. Les produits de finition liquide sont encore les plus utilisés, mais des procédés pour accélérer le séchage sont maintenant disponibles. De plus, certains produits de finition en poudre ont fait leur apparition sur le marché et sont présentement utilisés pour des panneaux de MDF [CARON, 2006].

2.4 Génération d'onde de choc

Ce projet de recherche vise à imprégner le bois plus rapidement en utilisant des ondes de choc. Or, il existe différentes méthodes pour générer ces ondes. Chaque méthode possède ses avantages et ses inconvénients. De plus, ces méthodes génèrent des ondes de profils temporels différents ne convenant pas toutes à l'imprégnation du bois. La méthode choisie devra permettre de générer une onde suffisamment forte. De plus, cette pression devra être maintenue suffisamment longtemps pour obtenir la pénétration souhaitée du bois le plus rapidement possible tout en respectant la résistance mécanique du bois. Cette section vise donc à faire un bref survol des différentes techniques de génération d'ondes de choc afin de pouvoir choisir la technique idéale pour la création d'une installation industrielle.

2.4.1 Tube à choc

Le tube à choc est la méthode la plus ancienne et la plus utilisée pour générer des ondes de choc en laboratoire. Dans cet appareil, une discontinuité de pression est créée entre une chambre de gaz à haute pression et une chambre de gaz à basse pression. Ces deux régions sont initialement séparées par un diaphragme. Quand la différence de pression est suffisamment grande, le diaphragme se rupture. Une onde de choc est alors formée. Elle se propage dans la chambre basse pression. Dans la plupart des installations, ce choc est réfléchi à l'extrémité du tube, créant un réservoir de gaz à haute pression [THOMPSON, 1988].

Le nombre de Mach du choc incident est donné implicitement par l'équation (2.6) :

$$\frac{P_4}{P_1} = \frac{2\gamma_1 M_s^2 - (\gamma_1 - 1)}{(\gamma_1 + 1)} \cdot \left[1 - \frac{\gamma_4 - 1}{\gamma_1 + 1} \cdot \frac{c_1}{c_4} \cdot \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) \right]^{\frac{-2\gamma_4}{\gamma_4 - 1}} \quad (2.6)$$

avec M_s le nombre de Mach du choc produit, P la pression, c la vitesse du son dans le gaz et γ le ratio de chaleur spécifique. On y remarque que le nombre de Mach du choc produit dépend principalement de la différence de pression initiale entre les tubes basse pression (P_1) et haute pression (P_4). Alors, en plus de la compression ordinaire du gaz, différentes astuces ont été développées pour augmenter ce ratio de pression, comme les tubes de compression à piston libre. Cependant, même si le ratio de pression tendait vers l'infini, le nombre de Mach demeurerait une valeur finie qui est donnée par l'équation (2.7) :

$$\lim_{P_4/P_1 \rightarrow \infty} M_s \approx \frac{\gamma_1 + 1}{\gamma_4 - 1} * \frac{c_4}{c_1} \quad (2.7)$$

Grâce à cette dernière équation, il est possible de constater que, pour un ratio de pression donné, il sera possible d'augmenter la force du choc en utilisant un gaz de compression avec une vitesse du son élevée ou un ratio de chaleur spécifique faible et un gaz de test avec une vitesse du son faible et un ratio de chaleur spécifique élevée [THOMPSON, 1988]. Ainsi, l'hélium est régulièrement utilisé comme gaz de compression à cause de sa vitesse du son très élevé. Dans certains autres canons, le gaz de compression sera chauffé ou le gaz de test sera refroidi pour modifier leurs vitesses du son [CUMMINGS, 1974].

Plusieurs modifications de ce concept de base sont apparues avec les années. Dans les tubes comportant des diaphragmes qui rupturent, on retrouve les tubes à combustion, les tubes

à piston libre, les tubes de Ludwig, etc. Plus récemment, des chercheurs sud-africains ont développé un tube à choc pour produire des chocs puissants dans un liquide. Ce tube utilise la différence de pression entre les deux chambres pour propulser un projectile qui entrera ensuite en collision avec le liquide. L'impact produit un choc dans le liquide d'amplitude proportionnelle à la vitesse du projectile et de durée proportionnelle à sa masse. Un mécanisme permet de remplacer le projectile facilement après chaque test [SKEWS et coll., 2004].

Il est également possible de concevoir des tubes n'utilisant pas de diaphragmes. Dans cette catégorie, il y a notamment les tubes à explosion pour produire des chocs puissants [MINTSEV et FORTOV, 1982] et divers mécanismes servant à remplacer le diaphragme pour des tubes à choc classique [ONODERA, 1992; TATE et SELLERS, 2000; FERRARA et coll., 2003]. Les mécanismes d'ouverture sans diaphragme permettent de créer des chocs répétables et d'enlever l'opération de remplacement du diaphragme. Cependant, les mécanismes actuels permettent de créer seulement des chocs assez faibles. La technique automatisée de remplacement du diaphragme développée par CUMMINGS [1974] pour son tube à choc cryogénique pourrait alors être une autre option intéressante.

Les équations (2.6) et (2.7) sont établies pour un écoulement à une dimension seulement. Or, il est également possible d'augmenter la force du choc grâce à une réduction de section du tube basse pression. Cette réduction peut être placée au niveau du diaphragme ou plus loin dans la chambre à basse pression. Réduire la section dans la chambre basse pression est une manière économique d'augmenter les performances d'un tube à choc déjà existant. De plus, le renforcement du choc est plus important pour un choc incident plus faible [EMANUEL et coll., 2005]. Ce pourrait donc être une excellente façon d'augmenter la performance des tubes à choc sans diaphragme.

2.4.2 Générateurs électroniques

La recherche bibliographique effectuée a permis de recenser quatre types d'appareils dans cette famille : les générateurs électrohydrauliques, les générateurs piézoélectriques, les générateurs électromagnétiques et les générateurs thermohydrauliques. Ces quatre techniques permettent de créer seulement des ondes de choc de faible durée et d'amplitude comparable aux petits canons à choc. Cependant, ces générateurs sont très faciles à mettre en place, car ils utilisent seulement de l'énergie électrique pour fonctionner.

Tout d'abord, les générateurs électrohydrauliques créent des ondes de choc à la suite d'une

décharge d'électricité à haut voltage. L'onde de choc peut-être produite par le passage du courant entre deux électrodes placées dans le milieu de propagation (source ponctuelle) [JAGADEESH et TAKAYAMA, 2002; OTSUKA, 2005; DION, 2006] ou à la suite de l'explosion d'un fil conducteur placé entre les électrodes [OTSUKA, 2005]. Le choc produit à la suite de l'explosion d'un fil est généralement plus fort, mais la durée est également plus courte. De plus, le fil doit être remplacé à chaque opération. Finalement, les électrodes doivent être remplacées très souvent et une installation particulière ne peut pas couvrir une grande étendue de chocs possibles. Malgré tout, la génération de chocs électrohydrauliques est une des méthodes les plus efficaces énergétiquement [HARTMANN et coll., 2000; HARTMANN et KIESER, 2002].

De leur côté, les générateurs piézoélectriques ont une grande durée de vie [SFERRUZZA et coll., 2000], ils sont faciles à utiliser, très flexibles d'utilisation (possibilités de générer différentes formes de signaux à différentes fréquences) et ils peuvent être construits de manière à focaliser une onde de choc sans utiliser de réflecteur ou de lentille [JAGADEESH et TAKAYAMA, 2002; DION, 2006]. Cependant, il est difficile de construire un grand générateur [HARTMANN et coll., 2000; HARTMANN et KIESER, 2002]. Il faut donc utiliser plusieurs générateurs dispendieux en parallèle pour obtenir une amplitude d'onde suffisante pour la plupart des applications. De nombreux chercheurs tentent toutefois d'augmenter l'amplitude des ondes produites par ces générateurs en utilisant des piézocomposites [CHAPELON et coll., 2000; DION, 2006], en empilant plusieurs éléments [SFERRUZZA et coll., 2000] ou en utilisant la dispersion fréquentielle dans un guide d'onde pour amplifier l'amplitude du signal fourni par le générateur [DION, 2006]. De plus, avec certains de ces générateurs, il est possible de contrôler la croissance et l'éclatement d'un nuage de cavitation autour d'une cible en produisant des ultrasons à deux fréquences différentes. Cette technique permet d'obtenir une pression à l'éclatement de plus de 100 fois la pression acoustique au point focal [IKEDA et coll., 2006].

En troisième lieu, les générateurs électromagnétiques génèrent une onde en faisant vibrer un diaphragme métallique à l'aide d'un électroaimant actionné par une impulsion de courant de grande intensité [REICHENBERGER et NASER, 1986; HARTMANN et KIESER, 2002; SANKIN, 2003]. Ces générateurs ont une durée de vie acceptable, mais ce type de générateur peut seulement opérer dans une plage de pression et de durée de l'impulsion limitée [HARTMANN et KIESER, 2002]. Ils représentent tout de même une avenue intéressante pour la construction d'un grand générateur d'onde plane pour le traitement du bois.

Finalement, dans le générateur thermohydraulique (figure 2.13), une impulsion de courant

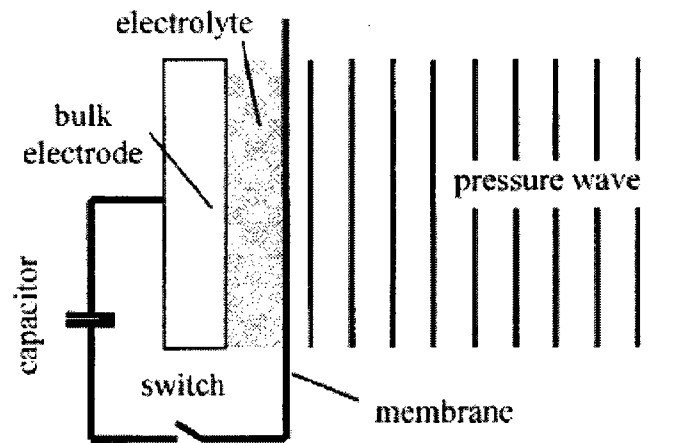


FIG. 2.13: Schéma d'un générateur thermohydraulique [HARTMANN et coll., 2000]

entre deux électrodes planes, une rigide et une flexible, chauffe un électrolyte. L'expansion thermique de l'électrolyte déplacera brusquement l'électrode flexible, créant une onde de choc. Ce générateur permet de créer facilement des ondes de choc dans un liquide. Sa longévité est importante et il pourrait être possible, en théorie, de fabriquer de grands générateurs d'onde surfacique et d'augmenter davantage l'amplitude et la durée des ondes de choc [HARTMANN et coll., 2000; HARTMANN et KIESER, 2002].

2.4.3 Autres méthodes de génération d'ondes de choc

Lasers

Une onde de choc est produite lorsqu'il y a déposition rapide d'énergie dans une zone donnée. Il est possible d'obtenir cet effet à l'aide de pulsation d'un laser de haute intensité. L'onde de choc est alors émise soit à l'extrémité rugueuse d'une fibre optique pour créer une onde de choc sphérique [NOSE et coll., 2004], soit à cause de la formation de plasma à la surface d'une cible d'aluminium [HONG et coll., 1998; HENRY et coll., 2001] pour générer une onde de choc unidimensionnelle. Cette méthode permet de générer des chocs très forts (100 MPa ou GPa), mais très courts (au maximum trois fois la durée de l'impulsion laser, qui est de quelques nanosecondes en général [HONG et coll., 1998]. Cette méthode s'avère intéressante pour des applications où la quantité importante d'énergie dissipée dans le processus pourrait être convertie en travail utile. Cette source est d'ailleurs très efficace énergétiquement [JAGADEESH et TAKAYAMA, 2002].

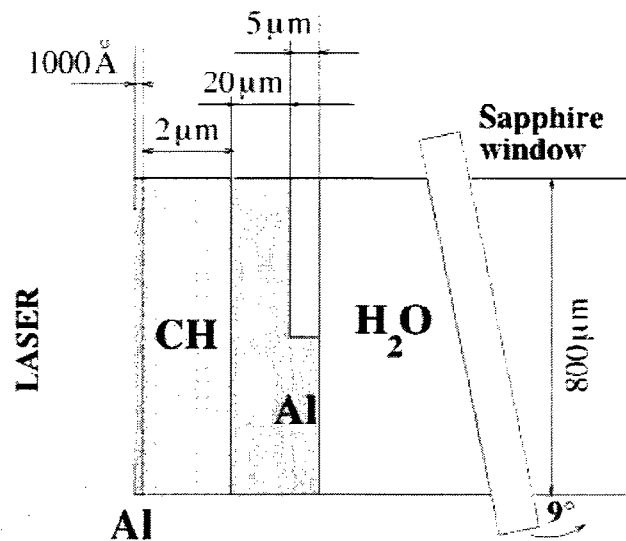


FIG. 2.14: Exemple de montage pour générer une onde de choc dans l'eau à l'aide d'une impulsion laser focalisée sur une surface d'aluminium. [HENRY et coll. 2001]

Explosifs

Les explosifs chimiques sont une des méthodes les plus connues pour générer une onde de choc. Ils permettent de créer des chocs de durée moyenne (μs) et de grande amplitude (MPa). Parmi les utilisations recensées, on retrouve notamment les tubes à choc à détonation [MINTSEV et FORTOV, 1982], les cordons d'explosifs servant à produire des chocs sous-marins [ITOH et coll., 1998; OTSUKA et coll., 2006]] et les micro-explosifs [JAGADEESH et TAKAYAMA, 2002]. Cependant, les réglementations sévères rendent difficile leur utilisation dans le cadre d'un procédé industriel [OTSUKA, 2005].

Coup de bélier

Le coup de bélier est une onde de choc qui se forme lorsqu'un écoulement de liquide voyageant rapidement est brusquement arrêté par la fermeture d'une valve ou par un changement rapide de direction. Ce phénomène est grandement étudié, car il peut causer des dommages importants à un réseau de conduits. Cependant, aucune application n'a encore été trouvée pour l'onde de choc produite.

2.4.4 Comparaison des différentes méthodes

Cette section ne vise pas à déterminer la méthode de génération des ondes qui sera utilisée pour traiter le bois, mais plutôt à donner un aperçu des différentes méthodes disponibles pour arriver à ce résultat. Ainsi, les lasers permettent de créer des ondes de choc de très grande amplitude, mais ces ondes sont de très courte durée. D'un autre côté, les tubes à choc génère des chocs de durée importante, mais la pression des ondes est plus faible. Les générateurs électroniques sont faciles à mettre en œuvre et permettraient de générer des ondes planes, mais ils ont d'autres contraintes, comme la présence de brevet, la durée plus limitée du choc et leur puissance plus faible que d'autres méthodes. Finalement, les décharges et les explosions sous-marines créent des ondes d'amplitude et de durée intéressante, mais il serait plus difficile de créer une installation de traitement du bois utilisant ces derniers principes.

Chapitre 3

MODÉLISATION D'UN ÉCOULEMENT DANS LE BOIS

Plusieurs chercheurs ont montré que les ondes de choc pouvaient améliorer l'imprégnation du bois. Cependant, il n'est pas possible pour l'instant d'établir comment les chocs arrivent à ce résultat. Afin d'apporter un élément de réponse et pour évaluer l'effet que les ondes pourraient avoir sur le bois, un modèle analytique a été développé pour calculer la pénétration d'un liquide dans un milieu poreux isotropique. Ce modèle se base sur la loi de Darcy, un modèle stationnaire. Toutefois, il doit être à même de prédire les variations à la suite d'une impulsion de pression. Cette section décrira les principales étapes de son développement ainsi que les résultats qui ont pu en être tirés.

3.1 Développement du modèle mathématique

3.1.1 Hypothèses

Dans ce modèle, le milieu poreux (bois) est considéré comme une réduction de section équivalente à la porosité. De plus, il est indéformable, de perméabilité constante et isotropique. Bien sûr, comme il a été démontré au chapitre précédent, le bois est un matériau anisotrope. La dernière hypothèse n'est donc pas valable dans le bois, mais elle permettra quand même d'obtenir une bonne approximation de la pénétration pour un écoulement unidimensionnel.

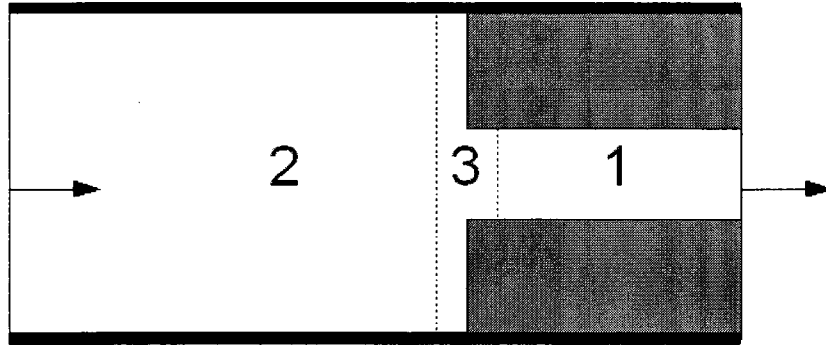


FIG. 3.1: Schéma des volumes de contrôle du modèle dynamique

Ensuite, le liquide sera considéré comme incompressible et le gaz et le liquide sont immiscibles. En plus, la compression du gaz à l'intérieur des pores est isentropique. Finalement, le système est isotherme, ce qui veut dire que seulement les bilans de masse et de quantité de mouvement seront considérés.

3.1.2 Développement des bilans

Le modèle dynamique de pénétration va être établi en combinant trois volumes de contrôles (figure 3.1) : un premier pour modéliser le liquide à l'intérieur des pores, un deuxième pour modéliser le liquide au-dessus du milieu poreux et un troisième pour représenter l'interface. Étant donné que le niveau de liquide dans le contenant va diminuer et que le gaz à l'intérieur du milieu sera repoussé plus en profondeur, les frontières du premier et du deuxième volume de contrôle seront mobiles. De plus, comme un volume de contrôle prend en compte la réduction de section, les deux autres volumes s'étendront jusqu'à la surface du bois, mais n'incluront pas celle-ci.

1^{er} volume de contrôle : Intérieur des pores

Le volume de contrôle à l'intérieur des pores a une frontière fixe (la surface de l'échantillon) et une frontière mobile (l'interface entre le liquide et le gaz). Comme la densité et la section sont constantes, le bilan de masse indique que la vitesse du liquide entrant dans les pores

sera égale à la vitesse de déplacement de l'interface gaz-liquide. Donc, la vitesse est égale à la dérivée de la pénétration (3.1).

$$u_p = \frac{dx}{dt} \quad (3.1)$$

avec t le temps, x la pénétration du liquide et u_p la vitesse du liquide circulant dans les pores. Pour ce qui est de la quantité de mouvement, il faut comptabiliser la variation due à la déformation du volume de contrôle, à l'entrée de liquide dans ce volume et l'effet des trois forces agissant sur ses frontières. Ces forces sont la pression exercée à l'intérieur des pores par l'onde de choc, la pression du gaz à l'intérieur du bois (pression ambiante) et le frottement visqueux du fluide dans la microstructure. En considérant tous les éléments, le bilan de quantité de mouvement pour ce volume de contrôle s'écrit comme suit :

$$\frac{d}{dt} \left(\rho \cdot A \cdot \phi \cdot x \cdot \frac{dx}{dt} \right) - \rho \cdot A \cdot \phi \cdot \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 = A \cdot \phi \cdot (P_p - P_i - \sigma_\mu) \quad (3.2)$$

avec ρ la densité du liquide, A la section de matériau étudiée, ϕ la porosité du milieu, P_p la pression appliquée à l'entrée des pores, P_i la pression du gaz à l'intérieur du milieu poreux et σ_μ la perte de charge due au frottement visqueux. Cette équation peut-être simplifiée pour prendre la forme d'une équation différentielle de deuxième ordre (3.3) :

$$\rho \cdot x \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = P_p - P_i - \sigma_\mu \quad (3.3)$$

La pression interne devrait rester invariable étant donné le léger déplacement du liquide, même si un gradient de pression pourrait possiblement se créer à l'intérieur de l'échantillon à cause de la faible perméabilité du bois. La pression externe variera avec le temps et est une inconnue dans ce système. Pour sa part, la perte de charge causée par la friction dans les pores est proportionnelle à la vitesse du fluide. Si la perméabilité est constante (milieu poreux indéformable), la loi de Darcy (3.4) permettra de calculer la chute de pression visqueuse pour un débit donné de fluide, et ce, même si cette loi est valide pour des écoulements en régime permanent. Elle reste tout de même l'équation la plus utilisée à ce jour pour décrire un écoulement dans le bois, et ce, malgré toutes ses limitations (voir la section 2.1.2).

$$\sigma_\mu = (F_0 + 1) \cdot \frac{\phi}{k} \cdot x \cdot \mu \left(\frac{dx}{dt} \right) \cdot \frac{dx}{dt} \quad (3.4)$$

avec F_0 le nombre de Forchheimer, $\mu(dx/dt)$ la perméabilité dynamique du liquide (non-newtonien) et k la perméabilité du milieu poreux. Pour ce qui est du nombre de Forchheimer, c'est le ratio entre le terme de perméabilité quadratique et la perméabilité linéaire. Comme aucune information n'est disponible sur la valeur de ce paramètre dans le bois, le nombre de Forchheimer sera toujours considéré égal à zéro dans les calculs effectués. Pour la viscosité dynamique, une équation décrivant le comportement rhéofluidifiant de la teinture a été obtenue à la section 3.2. Maintenant, en combinant les équations (3.3) et (3.4), on obtient une équation différentielle non linéaire du second ordre (3.5).

$$\rho \cdot x \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = P_e - P_i - (F_0 + 1) \cdot \frac{\phi}{k} \cdot x \cdot \mu(dx/dt) \cdot \frac{dx}{dt} \quad (3.5)$$

2^e volume de contrôle : Masse liquide au dessus du milieu

Tout comme le premier volume de contrôle, ce volume a une frontière fixe à la surface de l'échantillon et une frontière mobile à la surface libre du liquide. Comme pour le bilan de masse précédent, la vitesse sera égale au déplacement de l'interface. Ainsi, l'équation (3.6) est très similaire à l'équation (3.1).

$$u_g = -\frac{dz}{dt} \quad (3.6)$$

avec z la hauteur de liquide au dessus de l'échantillon et u_g la vitesse du liquide à l'extérieur du milieu poreux. Concernant la quantité de mouvement, la frontière mobile, la gravité et la différence de pression modifieront sa quantité totale dans le volume de contrôle. En effectuant les mêmes simplifications que pour le premier volume de contrôle, on obtient la forme simplifiée suivante :

$$\frac{d^2z}{dt^2} = -g - \frac{P_e - P_g}{\rho z} \quad (3.7)$$

avec g l'accélération gravitationnelle, P_e la pression externe et P_g la pression à la surface du milieu poreux.

3^e volume de contrôle : Surface

En ce moment, le système comprends deux équations différentielles de deuxième ordre pour déterminer la pénétration et la hauteur de liquide. Cependant, il y a deux autres inconnus dans le système : la pression à la surface du milieu poreux et tout juste à l'intérieur de ce même milieu. Il manque donc deux équations. Ces équations seront établies à l'aide d'un dernier volume de contrôle placé à la surface de l'échantillon.

Tout d'abord, le bilan de masse nous permet d'obtenir une équation supplémentaire. Ainsi, la masse qui entre dans le volume doit en ressortir, car le liquide est incompressible, ce qui se traduit mathématiquement par (3.8).

$$u_p \cdot \phi = u_g \quad (3.8)$$

Maintenant, en combinant l'équation précédente avec les équations (3.1) et (3.6), il est possible d'écrire :

$$\phi \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{dz}{dt} = 0 \quad (3.9)$$

Pour le bilan de quantité de mouvement, l'hypothèse est faite que la pression appliquée par la surface de l'échantillon sur le liquide est égale à la pression P_g . Ainsi, en faisant la somme des entrées et des sorties, on obtient :

$$(P_p - P_g) \cdot \frac{\phi}{\rho} + \phi \cdot \frac{dx^2}{dt} - \frac{dz^2}{dt} = 0 \quad (3.10)$$

On a maintenant un système de deux équations différentielles de deuxième ordre (3.5 et 3.7) et de deux équations algébriques (3.9 et 3.10) pour trouver quatre variables (x , z , P_p et P_g). Il est donc possible de résoudre ce système.

Bilan de masse sur l'ensemble du système

Une dernière équation peut-être obtenue pour la résolution du problème en considérant la conservation de la masse sur l'ensemble du système. Ainsi, comme le liquide est incompress-

sible, son volume total sera constant. Mathématiquement, cette condition prend la forme de l'équation (3.11) :

$$z = z_0 - \phi \cdot (x - x_0) = V - \phi \cdot x \quad (3.11)$$

avec z_0 la hauteur initiale de liquide, x_0 la pénétration initiale et $V = z_0 + \phi \cdot x_0$ le volume total de liquide. Cette équation permettra de simplifier davantage le système d'équations.

Simplification du système d'équations

Avec la présence de trois équations algébriques, il est possible de simplifier considérablement le système pour arriver à résoudre une seule équation différentielle d'ordre 2.

Tout d'abord, les équations (3.9), (3.10) et (3.11) permettent d'exprimer z et P_g en fonction de x et de ses dérivées :

$$z = V - \phi \cdot x \quad (3.12)$$

$$\frac{dz}{dt} = -\phi \cdot \frac{dx}{dt} \quad (3.13)$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = -\phi \cdot \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} P_g &= P_p + \rho \cdot \frac{dx^2}{dt} - \frac{\rho}{\phi} \cdot \frac{dz}{dt} \\ &= P_p + \rho \cdot (1 - \phi) \frac{dx^2}{dt} \end{aligned} \quad (3.15)$$

Avec ces manipulations, il est possible de remarquer que l'équation (3.9) n'est rien d'autre que la dérivée de l'équation (3.11). Ainsi, le dernier bilan de masse n'ajoute pas vraiment d'équation supplémentaire au système, mais il permet de connaître les constantes d'intégrations, ce qui n'était pas évident avec le bilan de masse effectué pour la surface (équation (3.9)).

Ensuite, en remplaçant toutes les variables dans l'équation (3.7), une expression pour la

dernière pression inconnue (P_p) peut-être obtenue :

$$P_p = -\rho \cdot \phi \cdot z \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + \rho \cdot g \cdot z + P_e + \rho(\phi - 1) \cdot \frac{dx^2}{dt} \quad (3.16)$$

Dans la dernière équation, z n'a pas été remplacé par son expression en x pour simplifier l'écriture. Finalement, les équations (3.12) à (3.16) peuvent être insérées dans l'équation (3.5), ce qui permet d'obtenir une équation différentielle d'ordre deux dépendant uniquement de x :

$$\rho(x + \phi \cdot z) \frac{d^2x}{dt^2} = \rho \cdot z \cdot g + P_e - P_i - \rho(1 - \phi) \cdot \frac{dx^2}{dt} - (F_0 + 1) \cdot \frac{\phi}{k} \cdot x \cdot \mu \cdot \frac{dx}{dt} \quad (3.17)$$

3.1.3 Modélisation du choc

Dans ce problème, les ondes de choc représentent une discontinuité en vitesse et en pression. Entre deux ondes de choc, la pression externe est égale à la pression atmosphérique et seule la force gravitationnelle peut pousser le fluide dans le bois. Lors du passage du choc, la vitesse du liquide augmente brusquement avant de décroître progressivement. Pour sa part, la pression externe sera maintenue pendant la durée du choc avant de redescendre brusquement à la pression atmosphérique comme le montre la figure 3.2. Dans les faits, les ondes d'expansion réduiront progressivement la pression et influenceront également la vitesse, mais ces ondes n'ont pas été modélisées dans ce problème.

Ensuite, le tube à choc génère un choc dans l'air. La pression externe et la vitesse changeront seulement lorsque le choc se réfléchira à la surface du liquide et de l'échantillon. Il ne sera pas possible d'évaluer la pression et la vitesse initiale seulement à partir du nombre de Mach (calculée à l'aide de l'équation (2.6) de la page 35). Les impédances relatives des deux milieux (gaz et liquide) interviendront au moment de la réflexion.

Tout d'abord, le choc incident va venir modifier les propriétés de l'air. Il est possible de calculer les propriétés après les chocs à l'aide des équations suivantes [THOMPSON, 1988; WHITE, 2003] :

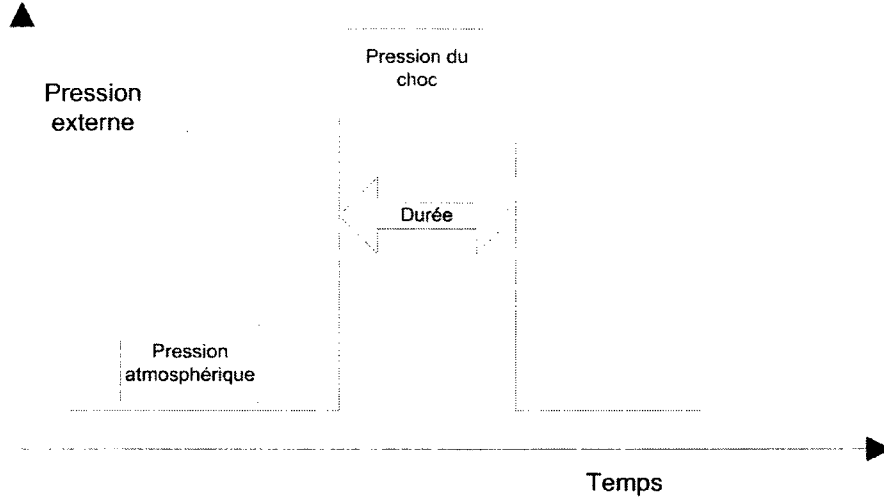


FIG. 3.2: Modification apportée par un choc sur la pression externe dans le modèle

$$\frac{P_2 - P_1}{P_1} = \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \cdot (M_s^2 - 1) \quad (3.18)$$

$$\frac{u_2 - u_1}{c_1} = -\frac{2}{\gamma + 1} \cdot \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) \quad (3.19)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = (2 + (\gamma - 1) \cdot M_s^2) \cdot \frac{2\gamma \cdot M_s^2 - (\gamma - 1)}{(\gamma + 1)^2 \cdot M_s^2} \quad (3.20)$$

$$c_2 = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_2} \quad (3.21)$$

avec P la pression, u la vitesse du fluide, c la vitesse du son dans le fluide, T la température, M_s le nombre de Mach du choc incident, γ le ratio de chaleur spécifique du gaz (1,4 pour de l'air aux conditions atmosphériques) et R la constante des gaz ($287 \text{ m}^2/(\text{s}^2)(\text{K})$). Les états 1 et 2 sont définis dans le tableau 3.1. Plus d'informations concernant la modélisation des tubes à choc sera fourni à la section 4.1.1.

Les propriétés du gaz vont encore changer lors du passage du choc réfléchi. Les équations (3.18) à (3.21) pourront encore être utilisées pour calculer le nouvel état en prenant l'état 2 comme état initial et l'état 5 comme état final. De plus, le nombre de Mach du choc réfléchi (M_r) sera utilisé pour les calculs. Toutefois, le nombre de Mach n'est pas connu dans ce cas.

Après la réflexion de l'onde de choc, la pression et la vitesse seront les mêmes pour le liquide et le gaz. Ainsi, il est possible de se servir des équations de changement d'état dans le liquide

| État | Définition |
|--------|--|
| État 1 | État initial de l'air dans la chambre basse pression et du liquide |
| État 2 | Air après le passage du choc incident |
| État 3 | État initial du gaz dans la chambre haute pression |
| État 4 | Gaz après le passage de toutes les ondes d'expansions incidentes |
| État 5 | Air après le passage du choc réfléchi |
| État 6 | Liquide au dessus du bois après le passage du choc |
| État 7 | Liquide dans les pores après le passage du choc |

TAB. 3.1: Définition des états de l'air et du gaz sous-pression dans un tube à choc.

pour trouver les quantités manquantes.

L'onde transmise dans le liquide ne sera pas suffisamment puissante pour modifier significativement la densité. Ainsi, elle pourra être assimilée à une onde acoustique. Comme le liquide est initialement au repos, l'augmentation de pression sera reliée à la différence de vitesse par l'équation (3.22) [THOMPSON, 1988] :

$$P_5 - P_1 = \rho_l \cdot c_l \cdot (u_5 - u_1) \quad (3.22)$$

avec ρ_l et c_l la densité et la vitesse du son dans le liquide. Les équations (3.18), (3.19) et (3.22) pourront alors être combinées afin de trouver le nombre de Mach de l'onde réfléchie. Elles permettront surtout de calculer la pression externe (correspondant à P_5) et la vitesse initiale du liquide au dessus du bois. Comme les équations ne sont pas explicites pour M_r , les valeurs seront obtenues itérativement en incrémentant la vitesse à partir de 0 (réflexion sur un mur d'impédance infini) jusqu'à ce que les deux milieux soient à la même vitesse et à la même pression.

À ce stade, la pression externe a été calculée, mais la vitesse du fluide ne représente pas encore la vitesse initiale dans les pores. Pour l'obtenir, il est nécessaire de calculer la réflexion de l'onde sur la surface du bois. Dans ce cas, la difficulté ne proviendra pas des équations, mais du changement de section. Effectivement, l'onde réfléchie sur la surface du bois et l'onde transmise dans le bois sont deux ondes acoustiques. Toutefois, la vitesse sera plus grande dans les pores qu'à l'extérieur à cause du changement de section. Ce problème peut se résoudre à l'aide d'un système de 4 équations et de 4 inconnues :

$$P_6 - P_5 = -\rho_l \cdot c_l \cdot (u_6 - u_5) \quad (3.23)$$

$$P_7 - P_1 = \rho_l \cdot c_l \cdot (u_7 - u_1) \quad (3.24)$$

$$u_6 = \phi \cdot u_7 \quad (3.25)$$

$$u_6^2 = \frac{(P_7 - P_6)}{\rho_l} \cdot \phi + u_7^2 \cdot \phi \quad (3.26)$$

avec 6 et 7 l'état final dans le liquide au dessus du bloc et dans les pores et ϕ la porosité. Les deux premières équations sont les équations d'onde acoustique, alors que les équations (3.25) et (3.26) représentent la conservation de la masse et de quantité de mouvement à l'interface. Cette méthode de résolution est d'ailleurs très similaire à celle développée par LI et coll. [1995] pour la réflexion d'une onde de choc sur un milieu poreux rigide idéal.

Finalement, en résolvant ce système, il est possible d'obtenir la vitesse initiale dans les pores. Ainsi, $\dot{x}_0 = u_7$.

3.1.4 Résolution numérique de l'équation différentielle

Les sections précédentes ont permis d'établir un système d'équations prédisant la pénétration d'un liquide dans un milieu poreux isentropique et de réduire ce système à une seule équation différentielle d'ordre deux. Malheureusement, cette équation reste très complexe, surtout si le fluide est non newtonnien. Il sera donc nécessaire de la résoudre numériquement en utilisant un programme Matlab.

Il n'est pas possible de résoudre directement une équation différentielle d'ordre deux numériquement : il est nécessaire de la transformer en un système de deux équations différentielles d'ordre un. En remplaçant x par y_1 et dx/dt par y_2 , il est possible de réécrire l'équation (3.17) ainsi :

$$\frac{dy_1}{dt} = y_2 \quad (3.27)$$

$$\frac{dy_2}{dt} = \frac{\rho \cdot (V - \phi \cdot y_1) \cdot g + P_e - P_i - \rho(1 - \phi) \cdot y_2^2 - (F_0 + 1) \cdot \frac{\phi}{k} \cdot x \cdot \mu \cdot y_2}{\rho \cdot ((1 - \phi^2) \cdot y_1 + \phi \cdot V)} \quad (3.28)$$

avec V le volume total tel que défini à l'équation (3.11).

Maintenant, il est possible de résoudre cette équation avec Matlab avec des conditions initiales appropriées (voir la section 3.1.3 pour le choc). Matlab propose plusieurs fonctions pour résoudre des systèmes d'équations différentielles. Ce problème est «*stiff*», c'est-à-dire qu'une des solutions du problème change très rapidement (la vitesse) comparativement à la solution recherchée (la pénétration). La fonction de base, utilisant la méthode de Runge-Kutta, est donc inefficace. Pour résoudre ce problème, la fonction *ode15s* est utilisée. Ce *solver* est d'ordre variable et il est basé sur les *numerical differentiation formulas*. Avec cette fonction, seulement quelques secondes sont nécessaires pour résoudre le systèmes d'équations.

3.2 Mesure des propriétés de la teinture

Le liquide utilisé pour tous les tests d'imprégnation est de la teinture pour bois Minwax acajou rouge. C'est un produit à base de solvant organique. Il ne sera donc pas possible de modéliser le liquide en utilisant les propriétés de l'eau. De plus, la teinture contient des pigments en suspensions, ce qui laisse croire qu'elle pourrait avoir un comportement rhéofluidifiant.

Ainsi, pour évaluer l'effet des chocs sur la pénétration, la teinture Minwax devra donc être caractérisée. Pour ce faire, sa densité, sa vitesse du son et de son comportement rhéologique seront mesurés. Ces paramètres pourront ensuite être intégrés dans l'équation (3.17) pour obtenir une prédiction de la pénétration dans le bois.

3.2.1 Mesure de la densité

Méthodologie

La densité de la teinture a été mesurée par la méthode de la pesée. Un cylindre gradué de 50 ml et une balance Ohaus E3000D ont été utilisés pour l'expérience. Ce cylindre gradué est préalablement pesé vingt fois pour établir la répétabilité de la balance et pour mesurer la masse initiale (m_i). Ensuite, la teinture est versée dans le cylindre gradué jusqu'à ce que le volume (V) atteigne $50 \pm 0,5$ ml. Le cylindre est alors immédiatement pesés pour éviter

que la teinture s'évapore, ce qui permet d'obtenir la masse finale (m_f). La masse volumique ρ est calculée avec l'aide de l'équation suivante :

$$\rho = \frac{(m_f - m_i)}{V} = \frac{M}{V} \quad (3.29)$$

avec M la différence entre la masse initiale et la masse finale.

Résultats

La masse initiale a été pesée 20 fois. La masse mesurée était de 73,25 g 19 fois sur 20 (95%). La masse mesurée avait une valeur différente à une seule reprise (73,26 g). La masse initiale moyenne est donc de $73,2505 \pm 0,0022$ g. La masse finale n'a été pesée qu'une seule fois, et sa valeur est de $115,21 \pm 0,01$ g.

En utilisant l'équation (3.29), la densité calculée est de 839 kg/m^3 . L'incertitude est calculée à l'aide de la formule de Kline et McClintock [ASHRAE, 1990]. Dans le cas présent, l'équation s'écrit comme suit :

$$\omega_\rho = \sqrt{\left(\frac{d\rho}{dM} \cdot \omega_M\right)^2 + \left(\frac{d\rho}{dV} \cdot \omega_V\right)^2} \quad (3.30)$$

avec $\frac{d\rho}{dM} = \frac{1}{V}$, $\frac{d\rho}{dV} = \frac{M}{V^2}$ et ω l'incertitude sur chacune des valeurs. Comme $\omega_M = 0,0122$ g et $\omega_V = 0,5$ ml, l'incertitude sur la densité est de $\pm 8 \text{ kg/m}^3$.

3.2.2 Mesure de la vitesse du son

Méthodologie

Pour mesurer la vitesse du son, une onde sera envoyée dans le liquide par un transducteur immergé dans le liquide (voir la figure 3.3. L'onde émise sera ensuite réfléchiée par le fond du récipient. Le temps que prendra l'onde pour revenir à son point de départ permettra de calculer la vitesse du son à l'aide de l'équation suivante :

$$c = \frac{2 \cdot d}{\Delta t} \quad (3.31)$$



FIG. 3.3: Transducteur piézoélectrique et récipient servant à mesurer la vitesse du son dans un liquide

avec c la vitesse du son dans le liquide, d la distance entre le transducteur et l'interface récipient-liquide et Δt le temps requis pour parcourir deux fois cette distance.

Pour ce test, un récipient de forme cylindrique en acier inoxydable sera utilisé. Ce contenant peut contenir 4 pouces de liquide en hauteur et il a un fond de 1 pouce d'épais. Le fond est épais pour éviter que les ondes qui y sont transmises et qui sont ensuite réfléchies sur la table ne créent de l'interférence avec les ondes réfléchies par le fond.

Pour générer l'onde dans le liquide et capter le signal de retour, un transducteur piézoélectrique avec une fréquence centrale (f_0) de 1 MHz sera utilisé en combinaison avec un oscilloscope Lecroy 9304A et un générateur de signal Agilent 33220A (figure 3.4). L'impulsion est émise par le générateur de signal. La durée de l'impulsion se calcule à l'aide de l'équation suivante :

$$D = \frac{1}{2f_0} \quad (3.32)$$

La durée de l'impulsion générée est donc de $0,5 \mu s$. Cette impulsion est ensuite transformée en une courte série de petites impulsions par l'émetteur piézoélectrique (voir la figure 3.5),

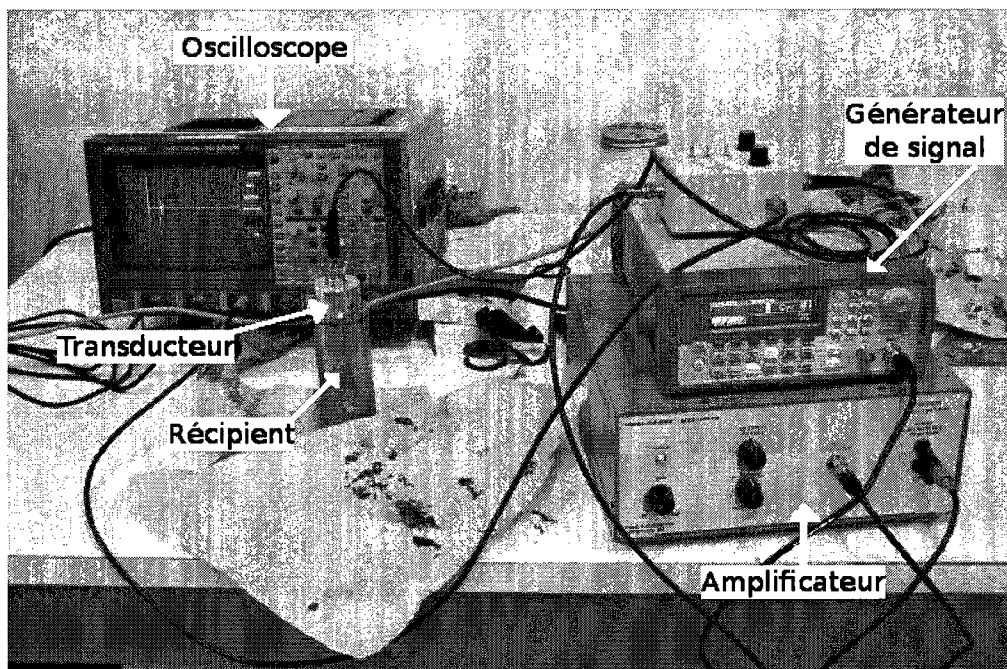


FIG. 3.4: Montage servant à mesurer la vitesse du son dans un liquide

déclenchant par le fait même le trigger de l'oscilloscope. Ces ondes voyagent dans le liquide et frappent le fond du contenant en acier avant de revenir au transducteur. La forme de l'onde reçue est également enregistrée sur l'oscilloscope, permettant de mesurer le temps qui s'est écoulé entre l'émission et la réception du signal.

La distance doit également être mesurée avec précision. Tout d'abord, la profondeur du contenant est mesurée à l'aide d'un vernier. Cependant, cette mesure ne représente pas la distance parcourue par l'onde. Il faut d'abord enlever la longueur occupée par le transducteur, puis multiplier cette longueur par deux pour obtenir la distance parcourue par l'onde.

Validation avec de l'eau

Afin de valider le montage, la vitesse du son dans l'eau a été mesurée. Dans un premier temps, le cylindre utilisé pour réaliser les tests d'imprégnation avec le tube à choc a servi de récipient. Ce cylindre avait 2 pouces de profondeur et le fond avait 0,5 pouce. La distance séparant l'émetteur du fond du récipient est de 31,56 mm et le temps requis pour faire l'all-retour est de 43,725 μs , ce qui donne une vitesse du son de 1443,57 m/s. L'eau pure a une vitesse du son de 1484 m/s [THOMPSON, 1988]. La vitesse du son mesurée est donc plus petite de 3%.

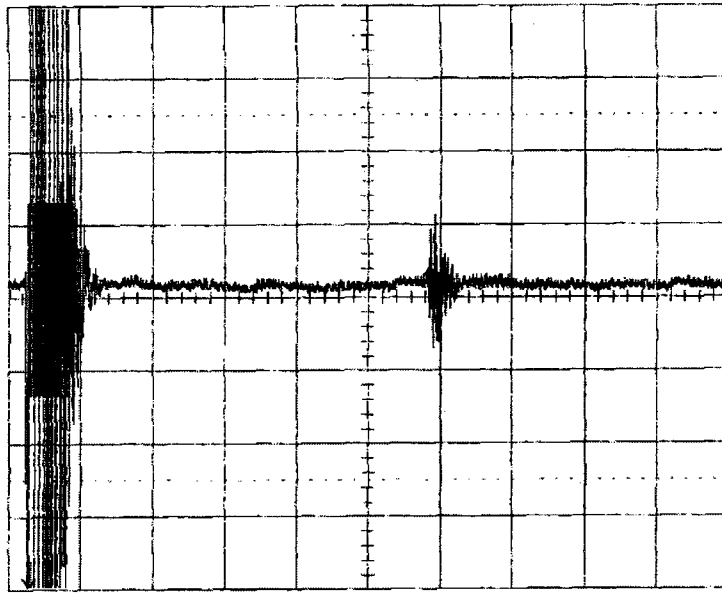


FIG. 3.5: Trace temporelle de l'impulsion émise et de l'écho reçu par le transducteur tel qu'enregistrée sur l'oscilloscope

Il est possible d'améliorer la précision de la mesure en modifiant deux éléments. Tout d'abord, le fond du récipient pourrait être épaissi. De cette manière, les ondes réfléchies à l'interface récipient-table pourrait former un groupe d'ondes distinct sur l'oscilloscope, évitant de créer une confusion au moment de mesurer l'écart temporel. Ainsi, un nouveau récipient a été usiné. Ce cylindre a un fond de un pouce. De plus, sa longueur a été augmentée afin de réduire l'incertitude relative sur la distance. Dans ce deuxième test, la distance parcourue est de $83,62 \pm 0,02$ mm et elle est obtenue en soustrayant l'épaisseur de l'émetteur (18 mm) à la profondeur du récipient (101,62 mm). Le temps requis pour parcourir la distance est de $113,2 \pm 1$ μ s. En utilisant l'équation (3.31) et en calculant l'incertitude à l'aide de la formule de Kline et McClintock, on obtient que la vitesse du son dans l'eau est égale à 1477 ± 14 m/s.

Résultat pour la teinture

Le même test a été répété avec de la teinture. Le tableau 3.2 présente les principaux résultats et leurs incertitudes.

Cette mesure montre que le son voyage moins rapidement dans la teinture que dans l'eau. Comme la teinture est aussi moins dense que l'eau, il en résulte que l'impédance de la teinture est plus petite que celle de ce liquide de référence de 21,5%.

3.2.3 Mesure de la viscosité

La viscosité est la propriété ayant le plus d'influence sur la pénétration de teinture. Ainsi, l'impédance a un effet sur les conditions initiales et la densité modifie l'inertie du système. Le modèle ne devrait pas être trop sensible à ces paramètres qui varient peu d'un liquide à l'autre. En comparaison, la viscosité peut changer de quelques ordres de grandeur pour deux niveaux de stress dans un fluide non newtonien. De plus, la force visqueuse, un des paramètres importants du système, est directement proportionnelle à cette propriété. La mesure du comportement rhéologique a donc une grande importance pour comprendre pourquoi un fluide pénètre mieux dans le bois qu'un autre.

Méthodologie

Les mesures rhéologiques ont été réalisées dans le laboratoire de biomécanique de l'Université de Sherbrooke. Le rhéomètre utilisé est un modèle AR 2000 de *TA instruments*.

Les tests ont été réalisés par un étudiant de ce laboratoire. Après avoir testé plusieurs méthodes, la mesure de la viscosité par écoulement en régime permanent a été choisie. Un temps de moyennage important a été utilisé afin de permettre à la teinture d'atteindre son régime permanent.

Résultats

La figure 3.6 montre la variation de la viscosité de la teinture en fonction de la vitesse de cisaillement. Au vu de ces résultats, il est possible de classer ce liquide comme un fluide non newtonien à comportement rhéofluidifiant. Effectivement, sa viscosité diminue lorsque la vitesse de cisaillement augmente [WOLFF et DUPUIS, 1994]. De plus, la présence de deux plateaux de viscosité constante (zone newtonienne) est également typique de ce type de fluide.

| Paramètre | Valeur | Incertitude | Unités |
|-----------------------------|--------|-------------|---------|
| Distance d | 83,62 | $\pm 0,02$ | mm |
| Temps requis (Δt) | 124,1 | ± 1 | μs |
| Vitesse du son c | 1348 | ± 11 | m/s |

TAB. 3.2: Mesure de la vitesse du son dans la teinture Minwax

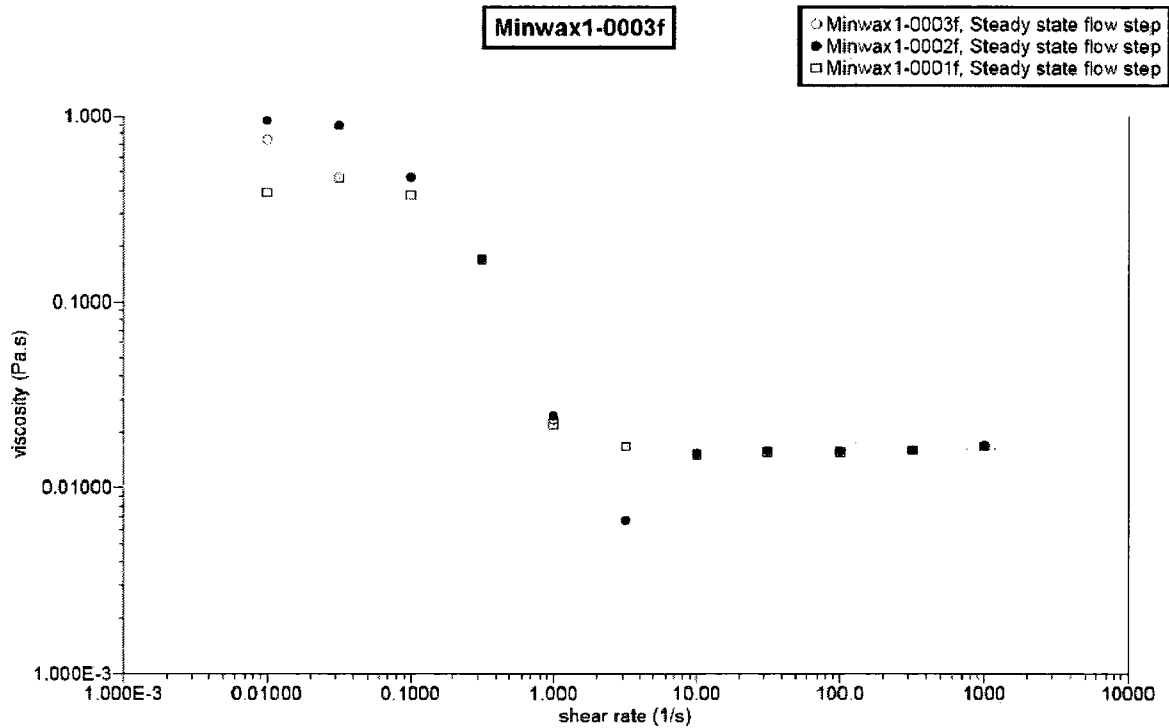


FIG. 3.6: Résultat des trois séries de mesures rhéologiques pour la teinture Minwax

En ce qui concerne les plateaux, la viscosité semble partir d'une valeur d'environ 0,9 Pa.s pour descendre au deuxième plateau, situé à environ 0,016 Pa.s. Cette différence correspond à une réduction de 56 fois de la viscosité. Il semble y avoir également un minimum de viscosité à $3,162 \text{ s}^{-1}$, ce qui est un peu particulier. Des mesures plus poussées seraient nécessaires pour éclaircir ce point.

Finalement, il est possible de remarquer que la viscosité mesurée lors du premier essai diffère des deux autres mesures à basse vitesse. Dans ce cas, le temps de moyennage était insuffisant. Les deux autres tests montrent que les mesures sont répétables, exceptées pour un taux de déformation de $0,01 \text{ s}^{-1}$ et de $3,162 \text{ s}^{-1}$.

Modélisation du comportement rhéologique

Pour pouvoir calculer la pénétration de la teinture dans un milieu poreux, encore faut-il pouvoir modéliser son comportement rhéologique. WOLFF et DUPUIS [1994] répertorient différents modèles utilisés pour décrire les fluides rhéofluidifiants. Cependant, il reste à calculer les coefficients de ces différents modèles. Cette opération a été réalisée à l'aide d'une

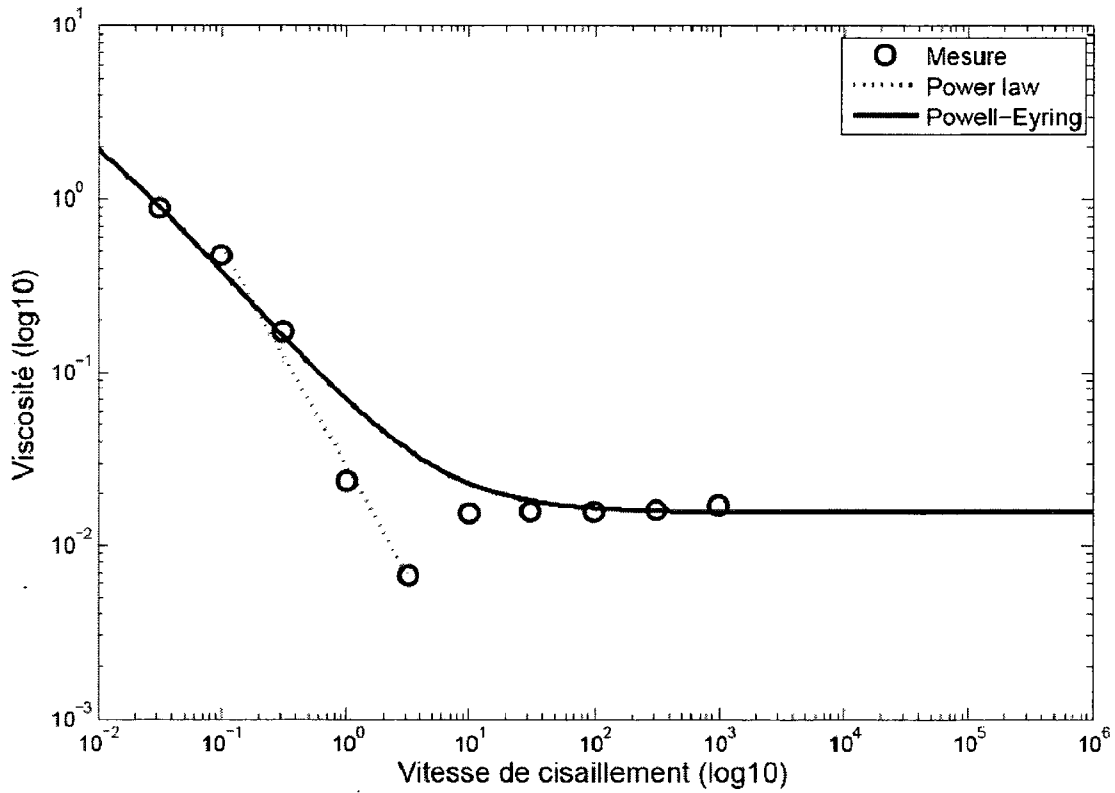


FIG. 3.7: Lissage de la loi de puissance et du modèle de Powell-Eyring pour représenter le comportement rhéologique de la teinture Minwax

implémentation Matlab de la méthode des moindres carrés.

Deux modèles sur les quatre testés ont permis d'obtenir des résultats intéressants : la loi de puissance de Ostwald et le modèle de Powell-Eyring [WOLFF et DUPUIS, 1994]. La méthode des moindres carrés a également été appliquée aux modèles de Prandtl et Williamson, mais les résultats n'étaient pas satisfaisants. La figure 3.7 montre le meilleur lissage pour les deux modèles retenus.

Tout d'abord, la loi de puissance d'Ostwald est l'équation la plus souvent rencontrée pour modéliser la décroissance. C'est en bonne partie dû à sa simplicité, comme il est possible de le remarquer dans sa définition [WOLFF et DUPUIS, 1994] :

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (3.33)$$

avec τ la contrainte de cisaillement, $\dot{\gamma}$ la vitesse de cisaillement et k et n les coefficients de

l'équation. Il est possible de réécrire cette équation pour obtenir la viscosité de cisaillement apparente (μ) en fonction de la vitesse de cisaillement. En utilisant la loi de Newton (3.34) [WOLFF et DUPUIS, 1994], on obtient l'équation d'Ostwald pour la viscosité (3.35).

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (3.34)$$

$$\mu \cdot \dot{\gamma} = k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (3.35)$$

Finalement, en prenant le logarithme en base 10 de chaque côté, il est possible de réécrire l'équation sous la forme suivante :

$$\log_{10} \mu = (n - 1) \cdot \log_{10} \dot{\gamma} + \log_{10} k \quad (3.36)$$

Il est maintenant possible d'utiliser la méthode des moindres carrés pour trouver les paramètres. En essayant de relier les deux plateaux (ce qui équivaut à ne pas tenir compte des points à $\dot{\gamma}$ égal à 1 et 3,162), les meilleures valeurs de n et de k sont respectivement de 0,2845 et de 0,0794.

La même démarche est reprise avec le modèle de Powell-Eyring (3.37) en remplaçant la contrainte de cisaillement par la viscosité de cisaillement apparente (3.38) :

$$\tau = A \cdot \dot{\gamma} + B \cdot \operatorname{asinh}(C \cdot \dot{\gamma}) \quad (3.37)$$

$$\mu = A + B \cdot \frac{\operatorname{asinh}(C \cdot \dot{\gamma})}{\dot{\gamma}} \quad (3.38)$$

avec A , B et C les paramètres du système. Toutefois, un des facteurs (C) n'est pas explicite dans cette équation. La méthode des moindres carrés ne permettra pas de le définir automatiquement. Une recherche de la meilleure valeur possible sera donc réalisée manuellement par itération.

Finalement, en utilisant la décroissance dans les mêmes conditions que la loi d'Ostwald et en considérant le deuxième plateau newtonien dans le calcul, les meilleurs facteurs obtenus pour la loi de Powell-Eyring à l'aide de la méthode des moindres carrés sont :

$$\begin{aligned}
A &= 0,0155 \\
B &= 0.0078 \\
C &= 610
\end{aligned}$$

Finalement, le choix s'est porté sur le modèle de Powell-Eyring pour calculer la viscosité dans la modélisation de l'écoulement dans le milieu poreux. Effectivement, il est aussi performant que la loi de puissance pour représenter la décroissance. De plus, il modélise bien le deuxième plateau newtonien. Le premier plateau est plus problématique, mais il a un intérêt limité dans le problème, la vitesse de cisaillement restant généralement hors des limites de ce plateau.

Justement, afin de pouvoir évaluer la viscosité dans le modèle, il est nécessaire de calculer la vitesse de cisaillement. Cette opération sera effectuée en divisant la vitesse par un diamètre caractéristique. Ce diamètre peut être celui des parenchymes radiaux (environ $30 \mu\text{m}$) (voir la section 2.2.1) ou celui des ponctuations (environ 100 nm).

3.3 Validation du modèle à l'aide de cas extrême

3.3.1 Conduite de section constante sous l'effet d'un gradient de pression

Le premier cas type pouvant être résolu à l'aide de ce système d'équations est une conduite horizontale de section uniforme en régime permanent ou écoulement de Poiseuille. Le tableau 3.3 donne les paramètres initiaux de ce problème. La section constante se traduit par une porosité de un et le fluide utilisé est de l'eau aux conditions standard dont les propriétés sont données par THOMPSON [1988].

| Paramètres | | | Valeur | | | Paramètre | | | Valeur | | |
|----------------------|-------|-------|----------|--------|-------------------------|------------------|----------|---------|--------------------------|-------|-----------------|
| Pression externe | P_e | 1 MPa | Densité | ρ | 998,2 kg/m ³ | Pression interne | P_i | 100 kPa | Viscosité | μ | 1.002e-3 kg/m·s |
| Pénétration initiale | x_0 | 1e8 m | Porosité | ϕ | 1 | Vitesse initiale | y_{20} | 0 | Hauteur liquide initiale | z_0 | 2 cm |
| Rayon | R | 1 cm | Durée | | 1e5 s | | | | | | |

TAB. 3.3: Paramètres utilisés pour la conduite de section constante

Avec une section constante et en régime permanent, l'équation (3.17) de la page 47 peut se réécrire comme suit :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\Delta P}{x} \cdot \frac{k}{\mu} \quad (3.39)$$

En posant $k = R^2/8$, on obtient le calcul de la vitesse moyenne d'un écoulement de Poiseuille tel que présenté à la page 353 de WHITE [2003]. Pour une conduite de 1 cm, un gradient de pression de 900 kPa et une pénétration initiale de $1e8$ m, la vitesse calculée à l'aide de l'équation 3.39 est de $1,123e-4$ m/s. Pour sa part, la simulation arrive à un résultat de $1,1228e-4$ m/s, soit une erreur de seulement 0,4%. Il est donc possible d'affirmer que le code donne un résultat correct..

3.3.2 Régime permanent

Tel que présenté à la section 2.1, la loi de Darcy décrit les écoulements de fluide en régime permanent dans un milieu poreux. Ainsi, si le système étudié à l'aide du modèle dynamique atteint un régime permanent, il devrait respecter la loi de Darcy à cet endroit.

Le tableau 3.4 établit la liste des paramètres utilisés pour résoudre le problème. La pénétration initiale est assez élevée au départ pour que le système atteigne le régime permanent plus rapidement. La perméabilité utilisée est celle d'un échantillon de sapin de Douglas tel que décrit par RESCH [1967].

| Paramètre | Valeur | Paramètre | Valeur |
|--------------------------|------------------------|--------------------|--------------------------------|
| Pression externe | P_e 1 MPa | Densité | ρ 839,2 kg/m ³ |
| Pression interne | P_i 100 kPa | Viscosité | μ 0,0155 kg/(m)(s) |
| Hauteur liquide initiale | z_0 2 cm | Perméabilité | k $7e^{-16}$ m ² |
| Pénétration initiale | x_0 0,01 m | Porosité | ϕ 0,61 |
| Vitesse initiale | y_{20} $1e^{-7}$ m/s | Accélération grav. | g 0 |
| Durée | 600 s | Temps trempe | 0 |

TAB. 3.4: Paramètres utilisés pour la vérification de la loi de Darcy

La définition de la loi de Darcy est celle de la perméabilité, que l'on retrouve à l'équation (2.3) de la page 9. Concrètement, la perméabilité peut se calculer à partir des résultats de

la simulation à l'aide de l'équation suivante :

$$k = \frac{V_f \cdot x_f \cdot \mu \cdot \phi}{P_e - P_i} \quad (3.40)$$

avec x_f et V_f la pénétration et la vitesse à la fin de la simulation. En utilisant les paramètres du tableau 3.4, ces deux dernières valeurs sont respectivement de 0,01341 m et de 4,9686e-006 m/s. Avec ces résultats, la perméabilité calculée est bien de $7e^{-16} \text{ m}^2$.

3.3.3 Vérification de la perméabilité en tout point

La vérification de la perméabilité peut être réalisée à tout moment dans le problème. Ainsi, il sera possible de vérifier que le système d'équations se comporte bien avec un fluide non newtonien et en considérant l'effet de la gravité.

Pour réaliser ce test, les paramètres du tableau 3.4 seront encore utilisés à quatre différences près. Tout d'abord, la simulation intégrera le modèle de viscosité de la teinture Minwax. De plus, l'accélération gravitationnelle sera égale à $9,81 \text{ m/s}^2$. Finalement, contrairement au cas précédent, c'est le régime transitoire qui est intéressant ici. Pour ce faire, la pénétration initiale sera nulle et la vitesse initiale sera de 1 m/s .

Le calcul de la perméabilité sera légèrement différent. Afin de considérer la force gravitationnelle et le changement de section, la pression à l'interface à l'intérieur des pores, tel que défini à l'équation (3.16) de la page 47, remplacera la pression externe (P_e) dans l'équation (3.40).

La perméabilité calculée en tout point pour le cas étudié est constante, excepté pour les premiers points. À cet endroit, le changement rapide des propriétés entraîne une instabilité dans les solutions d'ordres supérieurs (vitesse et pression). Cependant, la pénétration varie beaucoup moins rapidement dans le temps. En conséquence, les légères irrégularités rencontrées lors d'un changement brusque de pression ne devraient pas avoir trop d'influence sur les résultats finaux. Le modèle peut donc être utilisé pour le calcul de la pénétration.

3.4 Étude du modèle pour le tube à choc

3.4.1 Identification des facteurs et paramètres étudiés

Lors de l'imprégnation du bois à l'aide d'onde de choc, il y a quatre éléments importants dont il faut tenir compte : le liquide, le bois, les chocs et les conditions de l'expérimentation. Dans le cas du modèle numérique, les paramètres de la résolution peuvent également avoir un effet sur le résultat final.

Le but de cette simulation est de reproduire aussi fidèlement que possible l'expérience qui sera réalisée avec le tube à choc. Pour ce faire, le modèle sera analysé en utilisant sensiblement les mêmes paramètres que pour les essais expérimentaux.

L'ensemble des paramètres pouvant influencer le système est présenté dans le tableau 3.5. Lors des essais expérimentaux, ces paramètres seront regroupés en trois catégories : ceux dont le niveau restera constant, ceux dont la variation sera étudiée et ceux qui ne seront pas maîtrisés (erreur expérimentale) [MONTGOMERY, 2005]. Toutefois, cette dernière catégorie sera absente de la simulation, car il est possible de choisir la valeur de tous les paramètres impliqués. Dans le cas présent, ces facteurs seront modélisés (pour évaluer l'erreur expérimentale) ou ils resteront constants (effet jugé négligeable).

| Bois | | Liquide | | Choc | Conditions | | Résolution |
|-----------------|--------|-----------|--------|---------|------------------|-------|------------|
| Porosité | ϕ | Densité | ρ | Mach | Profondeur | z_0 | x_0 |
| Dia. caract. | d | V du son | c | Durée | Accel. grav. | g | Tol. |
| Perméabilité | k | Viscosité | μ | Nb. tir | Pression stat. | P_s | |
| nb. Forchheimer | F_0 | | | | Temps trempe | | |
| | | | | | Température ini. | T_0 | |

TAB. 3.5: Paramètres pouvant influencer l'imprégnation du bois à l'aide d'onde de choc

Paramètres invariables de la simulation

Le tableau 3.6 établit la liste des facteurs qui demeureront constants dans ce problème. Tout d'abord, le liquide est une constante dans le cadre de cette maîtrise. Il s'agit de la teinture Minwax dont les propriétés ont été mesurées à la section 3.2. Ses propriétés ne changeront pas dans la simulation.

| Bois | | Liquide | | Conditions | | Résolution | |
|--------|------|---------|---------------|------------|-----------------------|------------|-------------------|
| ϕ | 0,45 | ρ | 839,2 kg | z_0 | 1 po | x_0 | 0 |
| F_0 | 0 | c | 1348 m/s | g | 9,81 m/s ² | Tol. | 1e ⁻¹³ |
| | | μ | non-newtonien | P_s | 1 atm | | |
| | | | | T_{tot} | 25 min. | | |
| | | | | T_0 | 294 K | | |

TAB. 3.6: Paramètres à un seul niveau dans le modèle

Ensuite, deux paramètres du bois ne varieront pas dans le système : le nombre de Forchheimer et la porosité. Tout d'abord, aucune étude n'a été trouvée pour chiffrer le nombre de Forchheimer du bois. Sa valeur a donc été fixée à zéro. Cependant, comme son effet est visible surtout à haute vitesse, ça ne devrait pas affecter beaucoup les résultats. Ensuite, la différence de porosité devrait être faible entre deux échantillons comparativement à la différence de perméabilité. Ce paramètre sera donc laissé constant, car une variation de la perméabilité représentera mieux la variabilité du bois. La porosité a été fixée à 0,45, qui est une valeur approximative obtenue à l'aide de l'équation 2.2 de la page 9 (la densité moyenne du merisier (*betula alleghaniensis*) séché à l'air est de 0,62 g/cm³ [TSOUMIS, 1991]).

Troisièmement, il n'est pas souhaitable que les conditions externes viennent influencer les résultats. Deux de ces paramètres sont susceptibles d'agir la pénétration : la profondeur et le temps de trempe. Cependant, ces deux facteurs ne devraient pas interagir avec les ondes de choc dans le modèle. La profondeur pourrait interagir avec les ondes si l'amortissement causé par les bulles d'air est important lors des essais expérimentaux. Cependant, ces paramètres seront fixés pour limiter le nombre de variables, car leur effet est jugé petit comparativement aux autres paramètres.

Finalement, s'il y a un facteur qui doit être négligeable dans un algorithme de résolution numérique, c'est l'effet de cet algorithme sur les résultats. La valeurs de x_0 et la tolérance absolue seront donc suffisamment faible pour ne pas affecter la précision d'influence sur le problème, mais suffisamment élevé pour permettre la convergence du modèle. Avec la fonction Matlab choisie, x_0 peut être nul et la tolérance absolue sera établie à 1e⁻¹³.

Paramètres évoluant dans le plan d'expérience

Maintenant, le tableau 3.7 montre les niveaux que pourront prendre les facteurs intervenant dans la construction du plan d'expérience. Tout d'abord, la perméabilité du bois varie d'un

échantillon à l'autre, même pour une même espèce. Comme aucune donnée n'était disponible pour du merisier, les valeurs fournies par RESCH [1967] pour du sapin de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) seront utilisées, car elles permettent d'établir une plage de variation pour la perméabilité au sein d'une espèce.

| Bois | | | Choc | |
|--------------|-----|---------------------------------|----------|------------------------|
| Perméabilité | k | 0,0004 à 0,0010 μm^2 | Durée | 75 à 335 μs |
| Dia. caract. | d | 100 nm et 30 μm | Mach | 1,92 à 2,72 |
| | | | Nb. tirs | 1 à 3 |

TAB. 3.7: Paramètres variant dans le plan d'expérience de la modélisation

Pour ce qui est du diamètre caractéristique, c'est une propriété insérée dans le système pour calculer le taux de déformation, et donc, la viscosité du liquide. Cependant, la valeur de ce paramètre pour un écoulement radial n'est pas facile à déterminer. Deux cas seront étudiés dans ce modèle : prendre le diamètre effectif moyen des ponctuations (environ 100 nm pour les bois durs) ou le diamètre des rayons (30 μm). Ce sont les deux voies de pénétration principales dans la direction radiale pour les bois durs (voir la section 2.2.1).

Pour terminer, le choc représente vraiment le cœur du problème. La durée, le nombre de Mach et le nombre de tirs seront les principaux paramètres étudiés dans la portion expérimentale de la recherche. Une attention particulière leur sera donc accordée afin de trouver les paramètres optimaux du traitement. Le modèle théorique évaluera leur effet pour la gamme d'ondes de choc pouvant être produite avec le tube à choc vertical du laboratoire (voir la section 4.1.1).

Plan d'expérience sélectionné

Le plan d'expérience choisi pour trouver les facteurs d'influences est un design de Box-Behnken à quatre variables numériques (la perméabilité, le nombre de Mach, la durée et le nombre de tirs). Le design sera répété deux fois pour prendre en compte les deux valeurs possibles du dernier paramètre étudié : le diamètre des pores.

Ce design a été choisi pour plusieurs raisons. Tout d'abord, c'est une méthode permettant de modéliser les effets quadratiques très efficace en terme de nombre de mesures requises. De plus, il est pivotable, c'est-à-dire que l'erreur est la même peu importe la direction [MONTGOMERY, 2005]. Ensuite, les facteurs peuvent prendre uniquement trois valeurs différentes, ce qui permet d'éviter de faire des calculs pour un nombre de tirs nuls. Finalement, comme

le design est répété pour chaque valeur du diamètre, il sera possible d'en retenir seulement la moitié afin de faire une analyse plus poussée pour un des deux diamètres.

Ce plan d'expérience a été réalisé à l'aide du logiciel Design Expert. Il est présenté à l'annexe A avec les résultats numériques de pénétration.

3.4.2 Résultats

Effet du changement du diamètre caractéristique

Le tableau 3.8 montre les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) du plan d'expérience définie à la section précédente. L'analyse a été réalisée avec le logiciel Design Expert.

| Paramètres | Moyenne des carrés | DDL | F |
|------------------|--------------------|-----|--------|
| Durée (A) | 2,03E-5 | 1 | 332 |
| Nb. Mach (B) | 1,65E-5 | 1 | 270 |
| Nb. tirs (C) | 1,63E-5 | 1 | 267 |
| Perméabilité (D) | 3,40E-3 | 1 | 55613 |
| Dia. carac. (E) | 2,6E-2 | 1 | 422000 |
| D ² | 7,90E-7 | 1 | 13 |
| AB | 1,52E-6 | 1 | 25 |
| AC | 1,49E-6 | 1 | 24 |
| AD | 4,05E-7 | 1 | 7 |
| AE | 1,02E-5 | 1 | 167 |
| BC | 1,27E-6 | 1 | 21 |
| BD | 3,40E-7 | 1 | 6 |
| BE | 8,27E-6 | 1 | 135 |
| CD | 3,23E-7 | 1 | 5 |
| CE | 5,46E-6 | 1 | 89 |
| DE | 2,09E-3 | 1 | 34126 |
| Résidus | 2,507E-6 | 41 | |
| Total | 0,031 | 57 | |

TAB. 3.8: Résultats ANOVA pour le modèle théorique en considérant les deux diamètres caractéristiques possibles. Dans ce tableau, DDL représente le nombre de degré de liberté de la variable et F est le résultat du test statistique de Fisher. La valeur du facteur F permet d'établir si le changement de valeur d'une variable a un effet significatif sur le résultat final.

Comme l'erreur pure est nulle dans ce modèle, tous les termes présentés sont importants. Cependant, trois termes dominant tous les autres paramètres du système : le diamètre caractéristique (E), la perméabilité (D) et l'interaction entre ces deux facteurs (DE). En se fiant uniquement à ces résultats, les ondes de choc semblent avoir un effet très limité. Cependant, le diamètre caractéristique a une influence beaucoup trop importante. Il vaut mieux étudier plus en détail ce qui se produit.

Les figures 3.8 et 3.9 montrent l'évolution temporelle de la pénétration pour un cas type. La première figure montre que, si le diamètre caractéristique est le diamètre moyen des rayons, les chocs ont un effet marqué sur la pénétration. À l'opposé, l'effet des chocs est à peine visible quand le diamètre caractéristique est égal au diamètre des ponctuations.

Dans le modèle, le diamètre caractéristique modifie seulement la viscosité du liquide par le biais du taux de déformation, qui est le ratio de la vitesse du liquide et du diamètre. Avec ces résultats, il est donc possible de conclure qu'une part importante du gain obtenu avec les ondes de choc provient du caractère rhéofluidifiant du liquide utilisé. Ainsi, dans le cas où le diamètre des rayons est le diamètre caractéristique, le choc permet à la teinture d'attendre son second plateau newtonien, ce qui réduit la viscosité. Avec le diamètre des ponctuations, le liquide est déjà à son second plateau. Le choc ne permet donc pas de réduire la viscosité, sauf quand la perméabilité est plus faible. Dans ce dernier cas, même si le diamètre est petit, la vitesse à l'équilibre est suffisamment faible pour que le choc vienne affecter la viscosité (voir la figure 3.10).

Afin d'éclaircir ce point, quelques calculs ont été réalisés à différentes perméabilités avec un fluide newtonien (benzène). Dans ce dernier cas, l'effet des ondes n'est même pas visible (voir la figure 3.11), et ce, peu importe la perméabilité. Ainsi, le modèle prédit que les ondes de choc permettront d'augmenter la pénétration des fluides rhéofluidifiants uniquement.

Une autre conclusion importante peut-être tirée de ces résultats. En observant l'interaction AE (voir la figure 3.12), il est possible de constater que l'effet d'un changement de perméabilité est plus marqué en utilisant le diamètre des ponctuations. Il est possible d'expliquer cette différence par l'effet des chocs. Ainsi, s'il n'y avait pas d'ondes de choc, une plus faible perméabilité devrait influencer davantage la pénétration pour le plus grand diamètre caractéristique, car une réduction de la vitesse entraînerait une hausse de la viscosité en même temps. Cependant, les ondes de choc permettent d'atteindre le second plateau newtonien, peu importe la perméabilité. Ils effacent donc une partie de la différence de perméabilité du bois. Ainsi, il est possible de croire que les ondes de choc permettent de traiter des essences

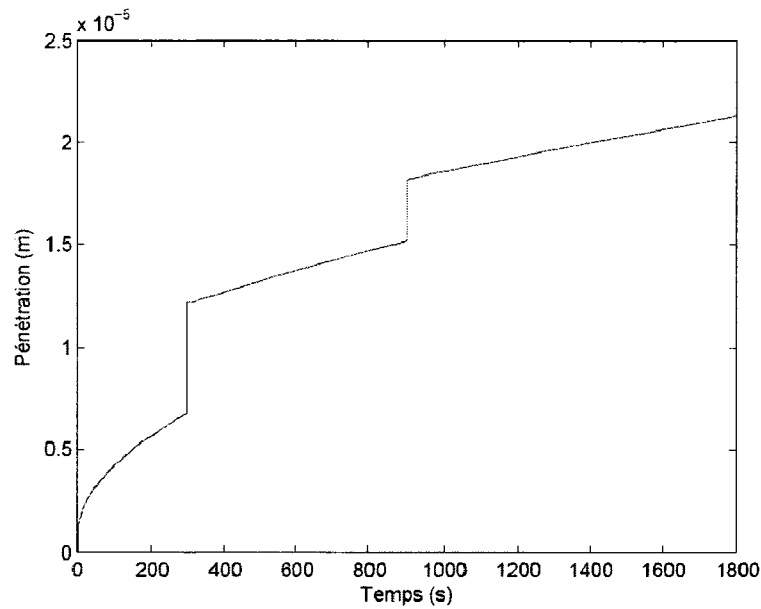


FIG. 3.8: Pénétration de la teinture en fonction du temps dans le cas où le diamètre représentatif est celui des rayons. La durée est égale à 205ms, le nombre de Mach est 2.32, le nombre de tirs est 2 et la perméabilité est égal à $7\text{e-}16 \text{ m}^2$

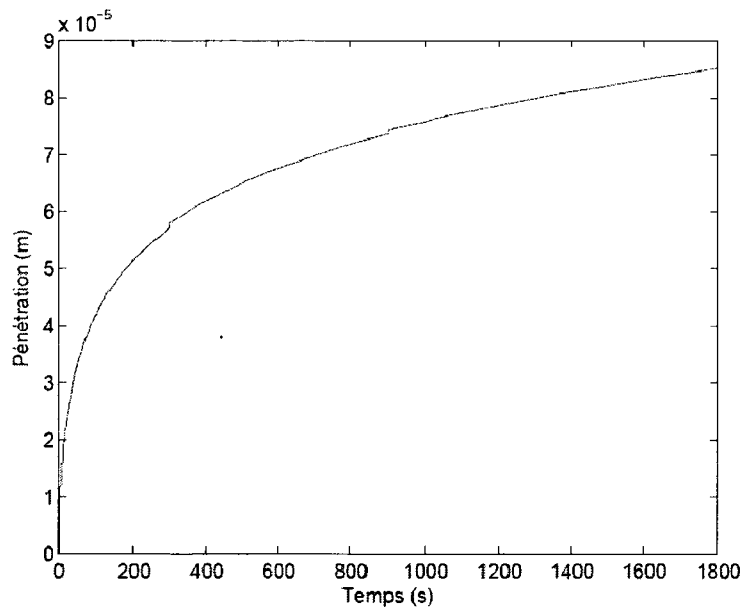


FIG. 3.9: Pénétration de la teinture en fonction du temps dans le cas où le diamètre représentatif est celui des punctuations. Les autres conditions sont identiques à celles de la figure 3.8

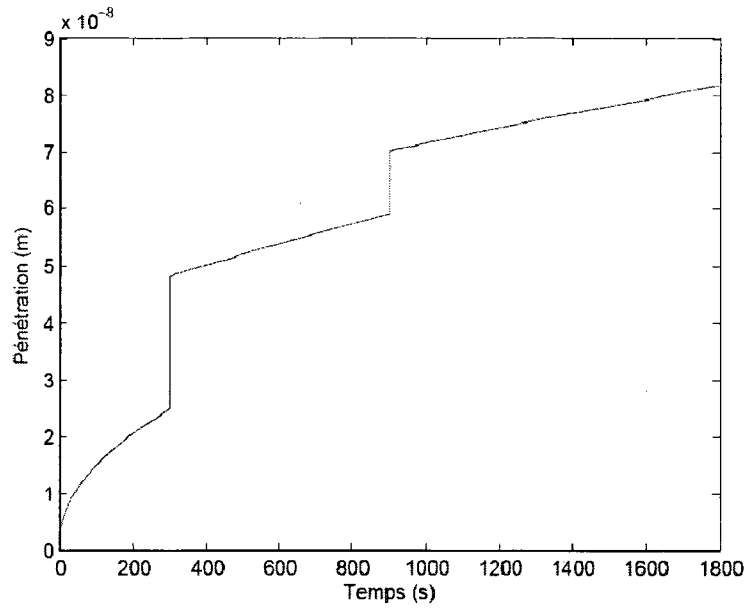


FIG. 3.10: Pénétration de la teinture en fonction du temps dans le cas où le diamètre représentatif est celui des ponctuations et pour une très faible perméabilité ($k = 1\text{e-}20 \text{ m}^2$). Les autres conditions sont identiques à celles de la figure 3.8

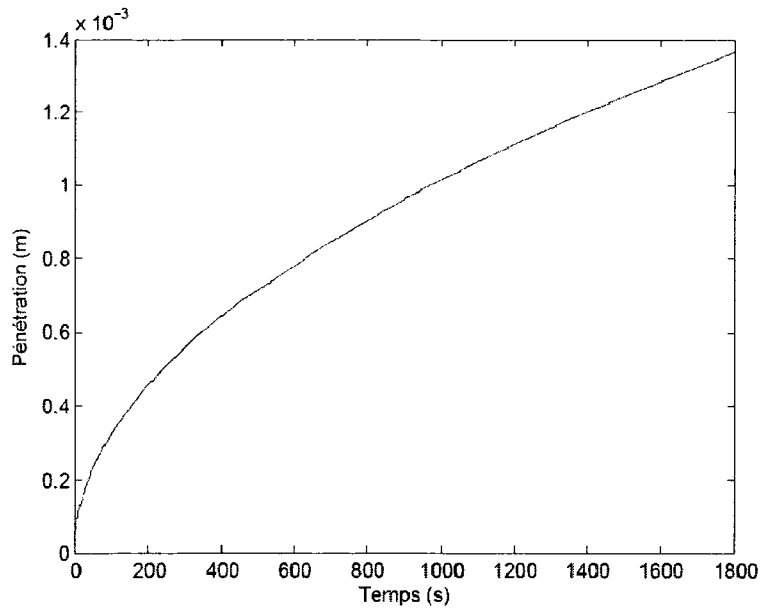


FIG. 3.11: Pénétration de benzène en fonction du temps dans les mêmes conditions qu'à la figure 3.8

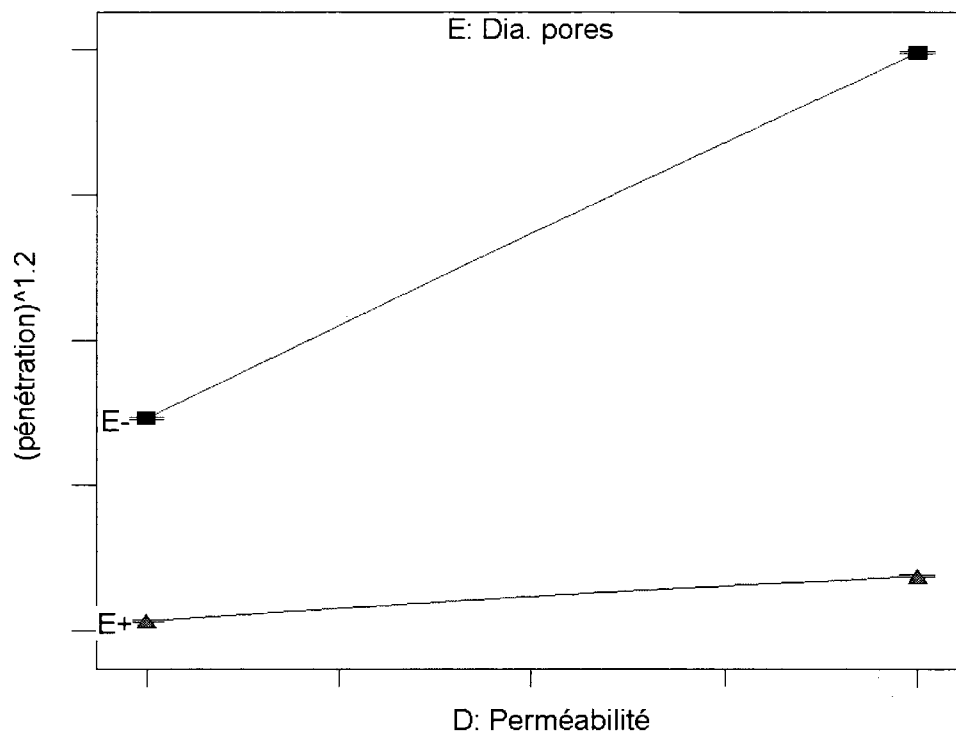


FIG. 3.12: Effet de la perméabilité sur la pénétration pour les deux diamètres différents. La ligne du haut représente le cas utilisant le diamètre des ponctuations, alors que celle du bas est valable pour le diamètre des rayons.

moins perméables et de diminuer l'effet des variations du bois sur la pénétration.

Comportement attendu du canon à onde de choc

La première section du calcul n'a pas permis de détecter d'effet significatif pour les différents paramètres de l'onde de choc. Afin de mieux étudier cet aspect, seulement un des deux diamètres caractéristiques sera conservé. Ainsi, seulement les résultats obtenus avec le plus grand diamètre caractéristique seront conservés. Effectivement, comme les chocs ont un effet notable dans la réalité, il est peu probable d'observer le comportement de la figure 3.9. De plus, le diamètre des rayons est plus représentatif du chemin parcouru par le liquide. Le passage du liquide au travers des ponctuations représente une infime fraction de son parcours dans le bois. De plus, comme discuté par OLSSON et coll. [2001], il est peu probable que le liquide puisse passer dans les ponctuations sans en endommager la membrane, ce qui signifie que leur diamètre effectif devrait être plus grand.

| Paramètres | Moyenne des carrés | DDL | F |
|------------------|--------------------|-----|----------|
| Durée (A) | 9,57E-5 | 1 | 8734,46 |
| Nb. Mach (B) | 7,70E-5 | 1 | 7030,62 |
| Nb. tirs (C) | 6,52E-5 | 1 | 5955,40 |
| Perméabilité (D) | 2,62E-4 | 1 | 23880,39 |
| A ² | 2,73E-7 | 1 | 24,94 |
| B ² | 2,58E-7 | 1 | 23,58 |
| C ² | 1,24E-7 | 1 | 11,33 |
| D ² | 1,69E-6 | 1 | 154,07 |
| AB | 6,25E-6 | 1 | 570,80 |
| AC | 5,17E-6 | 1 | 472,07 |
| AD | 1,61E-6 | 1 | 146,90 |
| BC | 4,30E-6 | 1 | 392,12 |
| BD | 1,33E-6 | 1 | 121,78 |
| CD | 1,11E-6 | 1 | 101,22 |
| Résidus | 1,53E-7 | 14 | |
| Total | 5,22E-4 | 28 | |

TAB. 3.9: Résultats ANOVA pour le modèle théorique en utilisant le diamètre des rayons

Le tableau 3.9 montre les résultats de l'analyse de la variance en conservant seulement la moitié du design utilisant le grand diamètre. On y observe que la perméabilité est toujours un facteur ayant une grande importance. Cependant, les trois paramètres du choc (durée, nombre de Mach et nombre de tirs) sont maintenant des facteurs beaucoup plus significatifs.

La première conclusion qu'il est possible de tirer de ces résultats est que la perméabilité a un effet énorme, même en considérant la variation au sein d'une même essence d'arbre. Lors des essais expérimentaux, il sera donc nécessaire de bien maîtriser cette variabilité. Une méthode efficace de préparation des échantillons est donc nécessaire. Cependant, l'importance la perméabilité signifie également de nombreuses répétitions devront être faites pour chaque combinaison de facteurs afin de réussir à isoler l'effet des différents paramètres du choc.

Après la perméabilité, les trois paramètres du choc sont ceux ayant le plus d'influence sur le système. C'est la durée qui améliore le plus l'imprégnation dans le cas présent. Suivent ensuite dans l'ordre le nombre de Mach et le nombre de tirs. Une augmentation de chacun de ces facteurs augmente la pénétration de la teinture (figure 3.13).

Les facteurs restant dans le système ont beaucoup moins d'influences. Cependant, il est intéressant de remarquer que les interactions faisant intervenir les paramètres du choc seulement

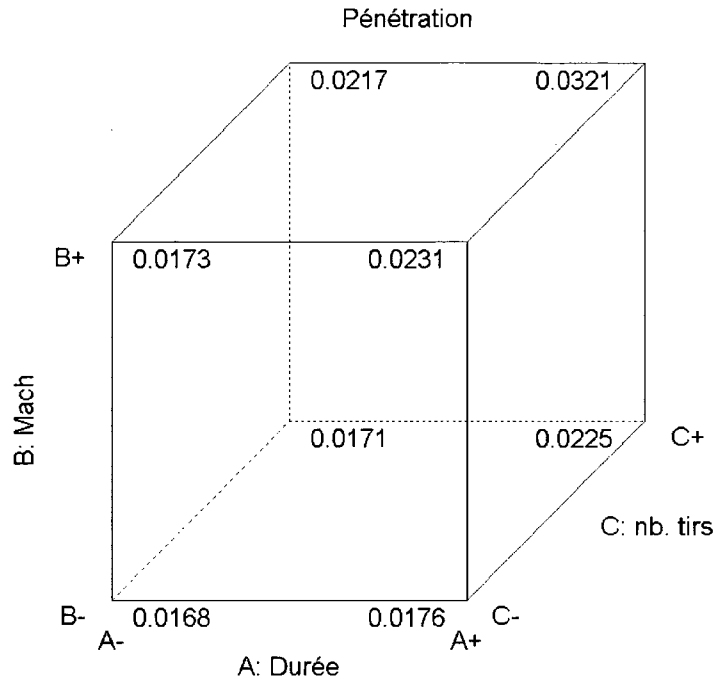


FIG. 3.13: Variation de la pénétration en fonction des différents paramètres du choc. Pour ce graphique, la perméabilité a une valeur de $7e-16 \text{ m}^2$

sont toutes plus importantes que les interactions incluant la perméabilité. Les trois paramètres du choc et leurs interactions sont donc suffisamment indépendants de la perméabilité pour éviter qu'elle modifie leur comportement. Les résultats trouvés pour des échantillons de perméabilité différente devraient donc être similaires pour la plage de perméabilités étudiés.

Finalement, les facteurs quadratiques ont tous une influence très faible sur le système. Cependant, cet effet n'est pas absent. Entre autres, il était attendu que l'effet du nombre de tirs plafonne. La figure 3.8 montre clairement que l'effet du nombre de tirs décroît avec la pénétration, le premier tir augmentant davantage la pénétration que le deuxième. Cependant, cette variation de la pénétration à chaque tir semble être masquée en partie par la pénétration survenant entre deux chocs. En utilisant un temps de trempe plus court, la courbure observée sur le nombre de tirs serait sûrement plus apparente avec l'analyse de la variance.

Différences possibles entre le modèle et les tests réalisés

Les conclusions de cette étude théorique seront bien utiles lors de la préparation et de l'analyse des résultats des essais expérimentaux. Cependant, il faut être conscient que ce

modèle ne représente pas tout à fait la réalité. Ainsi, en plus des hypothèses présentées à la section 3.1.1, les éléments suivants pourront possiblement expliquer les différences entre le modèle et la réalité :

1. Un plan d'expérience permet d'obtenir des résultats intéressants seulement en interpolant. Or, la perméabilité, la porosité et le diamètre caractéristique du merisier ne sont pas connus. Le comportement du système pourrait donc être différent avec cette essence de bois.
2. La méthode utilisée pour caractériser la durée du choc n'est pas identique au comportement réel. Le temps requis pour retourner à la pression d'équilibre pourrait avoir un effet significatif sur le système.
3. Les chocs pourraient endommager la microstructure, augmentant la perméabilité du bois.
4. Tels que décrit par plusieurs auteurs, les bulles présentes dans le liquide ou à la surface du bois pourraient amortir les ondes de choc.
5. Une augmentation de la vitesse peut réduire la perméabilité, mais cet effet n'a pas été modélisée.
6. La pression interne ne restera pas constante. En réalité, il se formera un différentiel de pression à l'intérieur de l'échantillon. Ce différentiel pourrait ralentir l'avance du liquide.

Ces différences nous rappellent qu'il est important d'utiliser les résultats obtenus ici avec prudence. Ils sont tout de même un excellent point de départ pour comprendre l'effet des ondes de choc sur l'imprégnation du bois.

Chapitre 4

ESSAI D'IMPRÉGNATION DU BOIS

À la lumière des résultats obtenus dans les deux chapitres précédents, l'utilisation d'ondes de choc semble une avenue intéressante pour accélérer l'imprégnation du bois. Toutefois, il reste à déterminer les variables influençant davantage le processus d'imprégnation. La réalisation d'essais d'imprégnation semble une bonne manière d'arriver à cet objectif.

La première partie de ce chapitre décrira les deux montages utilisés pour réaliser les tests : un tube à choc vertical et un cylindre pressurisé avec un générateur d'onde électronique. Ensuite, la procédure utilisée pour réaliser les tests sera décrite en détail. Finalement, les différentes séries d'essais d'imprégnation seront présentées en ordre chronologique avec les résultats obtenus, permettant au lecteur de bien suivre leur évolution.

4.1 Conception des deux montages utilisés

4.1.1 Tube à choc vertical

Caractéristiques du canon utilisé

La réalisation de tests d'imprégnation requiert un tube à choc vertical afin de pouvoir maintenir le liquide à son extrémité. Comme le laboratoire possédait déjà un tube de ce type (voir la figure 4.1), il n'a pas été nécessaire d'en fabriquer un nouveau. Toutefois, il est important de connaître les caractéristiques de ce tube (voir le tableau 4.1), car elles serviront à déterminer l'étendue des conditions pouvant être testées.

Ce canon permet de varier trois paramètres importants pour le choc. Tout l'abord, la longueur de la chambre haute pression modifiera le temps que prendront les expansions pour venir réduire la pression à l'extrémité du tube. Ainsi, elle définira le temps de plateau dont il a été fait mention à la page 48. Ce paramètre sera appelé dorénavant la durée du choc. Ensuite, il est possible de modifier la pression du gaz contenu dans la chambre haute pression à l'éclatement de la membrane. La pression à l'éclatement déterminera le nombre de Mach du choc. Ce paramètre influencera également la durée du choc.

Cependant, la pression à l'éclatement ne peut pas prendre n'importe quelle valeur. Cette pression sera déterminée par la ou les membranes qui seront utilisées lors des tests. Des essais ont donc été réalisés pour différentes combinaisons de membranes de mylar afin de mesurer leur pression d'éclatement approximative. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4.3 de la page 80.

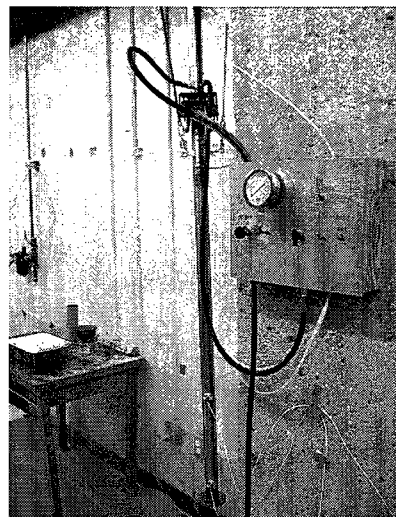


FIG. 4.1: Photo du tube à choc vertical utilisé pour les tests d'imprégnation

| Paramètres | Valeur |
|---------------------------------------|-------------------------|
| Longueur chambre basse pression (CBP) | 66,5 po |
| Diamètre intérieur du tube | 1,5 po |
| Longueur chambre haute pression (CHP) | 0 à 22,75 po |
| Masse approximative du canon | 21,3 kg |
| Pression maximale dans la CHP | 600 lbf/po ² |

TAB. 4.1: Caractéristiques du tube à choc utilisé pour les tests d'imprégnation

Finalement, le dernier paramètre pouvant être modifié dans ce système est le gaz utilisé dans la chambre haute pression. La durée et le nombre de Mach du choc seront différents selon la nature de ce gaz. Dans le cadre de ce projet, deux gaz pourront servir à pressuriser la chambre : l'azote et l'hélium. L'azote représente les conditions pouvant être obtenues avec de l'air. L'hélium permet cependant de générer des chocs plus puissants pour une même pression d'éclatement grâce à sa vitesse du son plus élevée (voir la page 35). Cette propriété fait également en sorte que les expansions reviennent plus rapidement réduire la pression au fond du tube avec l'hélium. L'azote permet donc d'obtenir une durée plus grande.

Simulation des conditions de choc

Avant d'imprégner, les caractéristiques des chocs pouvant être générés avec le tube ont été calculées analytiquement. Cette démarche permettra de choisir les conditions de tests les plus avantageuses. Le calcul a été réalisé à l'aide du code `tubechoc.m`, fait par l'auteur à l'hiver 2007 dans le cadre du cours « Combustion et dynamique des gaz ». La figure 4.2 montre son interface utilisateur. Ce programme a été validé à l'aide du code `shocktube.m` fourni gracieusement par Christian Hébert du LOCUS, mais qui ne calculait pas les conditions obtenus après la réflexion des ondes sur une surface solide.

Le tableau 4.2 indique les paramètres utilisés pour l'analyse. Tout d'abord, il est possible d'y remarquer que la longueur de la chambre haute pression ne variera pas dans cette analyse. En utilisant la longueur maximale, le calcul fournira la durée maximale pouvant être obtenue avec ce tube.

| Chambre HP | | | Chambre BP | | |
|----------------------|-----------|---------------------|------------------|------|-----|
| He ou N ₂ | | | Air | | |
| P4 | 100 à 600 | lbf/po ² | P1 | 1 | atm |
| T4 | 293 | K | T1 | 293 | K |
| L _{CHP} | 22,75 | po | L _{CBP} | 66,5 | po |

TAB. 4.2: Paramètres utilisés pour la simulation des conditions de test

Pour ce qui est de la température initiale dans le gaz de compression, l'hypothèse est faite que l'hélium entre suffisamment lentement dans la chambre haute pression pour que sa température demeure égale à la température de la pièce. En réalité, la température sera un peu plus basse à cause de la décompression, mais cet effet peut-être négligé dans la simulation.

Finalement, trois paramètres sont fonction du gaz utilisé : le rapport des chaleurs spécifiques (γ), la constante des gaz (R) et la vitesse du son (c). Les valeurs de ces paramètres pour différents gaz, dont l'air, l'azote et l'hélium, peuvent être trouvée à la page 640 dans THOMPSON [1988].

Maintenant, quatre paramètres nous intéressent à la sortie de ce code : la pression (P_5) et la vitesse (u_5) suivant le rebond du choc sur l'interface liquide, le nombre de Mach du choc incident (Ms) et la durée. Pour ce dernier paramètre, deux options sont possibles. Dans le premier cas, le choc réfléchi rencontre la surface de contact avant la première expansion. À la suite de ce contact, des expansions (ou un choc) seront réfléchies vers la teinture, mettant

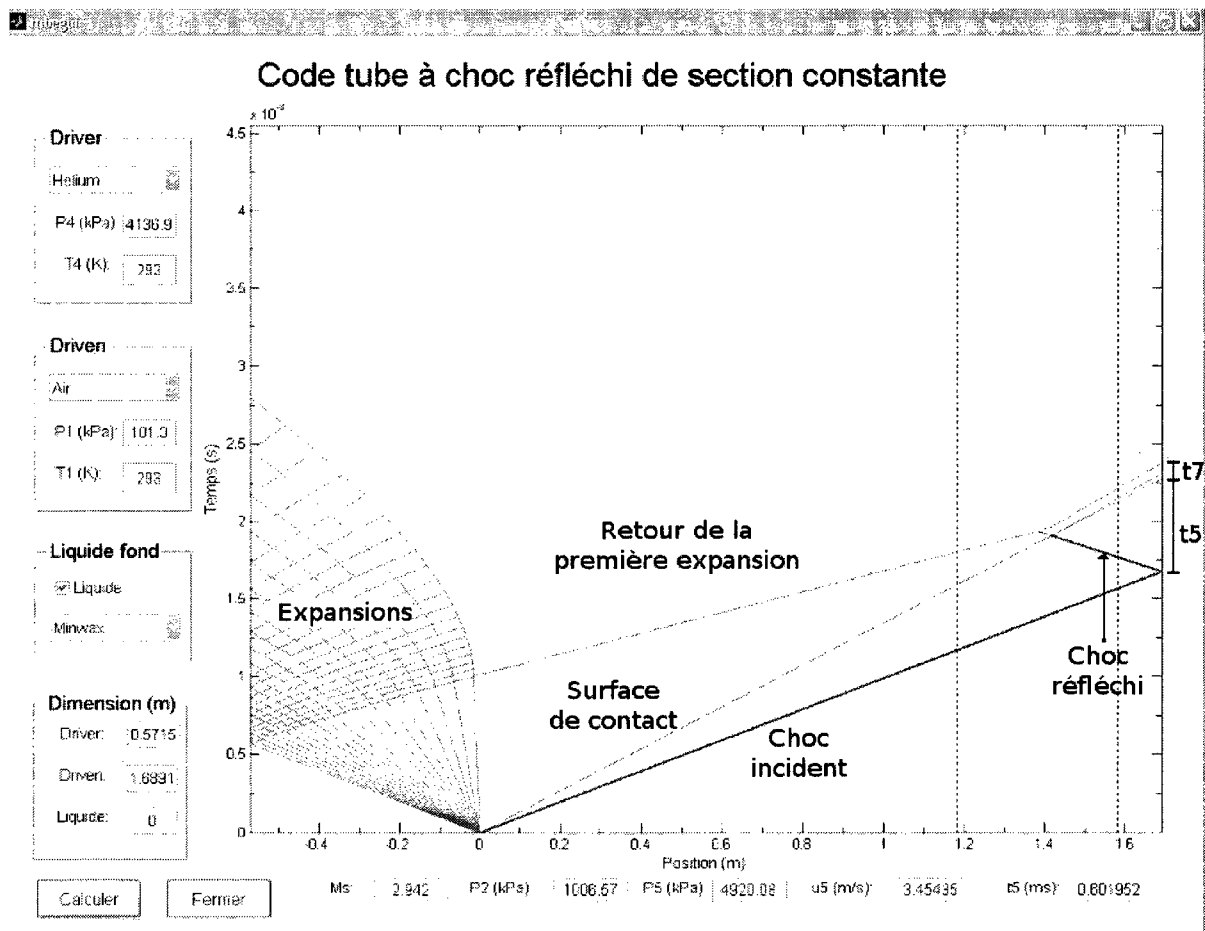


FIG. 4.2: Interface utilisateur du programme de modélisation du tube à choc. Les lignes épaisses représentent les chocs, les lignes fines les expansions et la ligne en gros pointillés la surface de contact. Les deux lignes verticales en petits pointillés représentent la position des capteurs de pression du tube. Le point zéro est la membrane séparant les deux chambres. Finalement, il est possible de remarquer que le choc réfléchi frappe la surface de contact avant les expansions dans le cas présent.

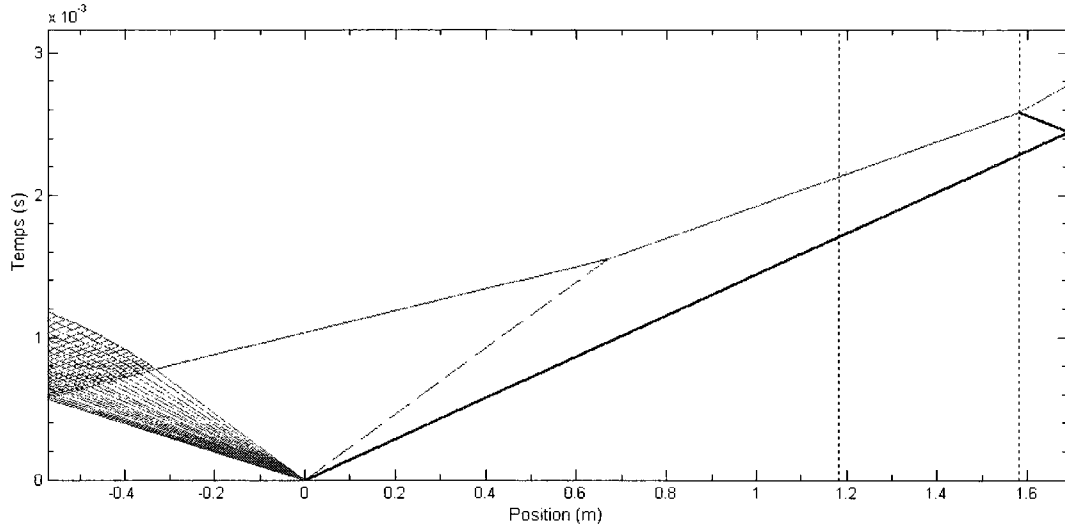


FIG. 4.3: Diagramme montrant les ondes générées à l'aide de 1000 kPa d'hélium. Les autres conditions sont celles décrite dans le tableau 4.2

fin au temps de plateau (voir la figure 4.2). Dans ce cas, la longueur de la chambre haute pression n'affectera pas la durée. Toutefois, ça ne signifie pas que cette longueur n'a pas d'effet sur l'imprégnation.

La figure 4.3 illustre bien le deuxième cas rencontré. À plus basse pression, le choc voyage moins rapidement. Alors, les expansions rencontrent la surface de contact avant lui. Elles vont donc croiser le choc réfléchi avant que celui-ci n'atteigne la surface de contact. Le moment où la première expansion réfléchie atteint la teinture détermine la durée.

Les résultats de ces simulations sont présentés dans le tableau 4.3. Ces données confirment que, pour une même pression à l'éclatement (P_4), l'hélium produit un choc plus fort et la durée est plus importante avec l'azote. De plus, la réflexion du choc sur la surface de contact crée un nouveau choc dans le gaz de test en utilisant l'azote, augmentant encore plus la pression jusqu'au retour des expansions initiales. Cette pression demeure toutefois sous les niveaux produits à l'aide de l'hélium.

Finalement, l'hélium permet d'obtenir une durée (t_5) maximale autour d'une pression d'éclatement de 520 lbf/po². Dans ce cas, la première expansion réfléchie et le choc atteignent la surface de contact en même temps. Cette condition représente donc la limite entre le comportement de la figure 4.1 et celui de la figure 4.3. L'azote n'a pas d'équivalent dans avec la longueur choisie pour la chambre haute pression, car le système se comporte comme à la figure 4.3 dans tous les cas étudiés. Toutefois, si la durée est définie comme le temps requis

| Membrane | P_4 | Gaz | M_S | P_5 | u_5 | t_5 | t_{5-7} |
|-----------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| Mylar 2 | 90 | Hélium | 1,74 | 957 | 0,541 | 0,273 | - |
| | | Azote | 1,47 | 503 | 0,235 | 2,68 | 2,7 |
| Mylar 3 | 130 | Hélium | 1,95 | 1390 | 0,845 | 0,316 | - |
| | | Azote | 1,58 | 661 | 0,339 | 2,19 | 3 |
| Mylar 2-2 | 190 | Hélium | 2,17 | 1984 | 1,27 | 0,383 | - |
| | | Azote | 1,70 | 860 | 0,474 | 1,80 | 3,2 |
| Mylar 5 | 240 | Hélium | 2,32 | 2435 | 1,60 | 0,431 | - |
| | | Azote | 1,77 | 1002 | 0,572 | 1,61 | 3,2 |
| Mylar 3-3 | 260 | Hélium | 2,37 | 2606 | 1,73 | 0,449 | - |
| | | Azote | 1,80 | 1055 | 0,609 | 1,55 | 3,2 |
| Mylar 7 | 310 | Hélium | 2,48 | 3010 | 2,03 | 0,489 | - |
| | | Azote | 1,86 | 1177 | 0,694 | 1,43 | 3,2 |
| Mylar 5-5 | 470 | Hélium | 2,77 | 4140 | 2,87 | 0,592 | |
| | | Azote | 1,99 | 1503 | 0,926 | 1,20 | 3,4 |
| Mylar 5-7 | 530 | Hélium | 2,85 | 4512 | 3,15 | 0,624 | - |
| | | Azote | 2,04 | 1607 | 1,00 | 1,14 | 3,4 |
| Mylar 7-7 | 600 | Hélium | 2,94 | 4920 | 3,45 | 0,602 | 0,65 |
| | | Azote | 2,08 | 1720 | 1,08 | 1,09 | 3,4 |

TAB. 4.3: Conditions simulées dans le tube à choc pour plusieurs pressions d'éclatement différentes

avant le retour de la première expansion réfléchi (t_{5-7}), elle augmente proportionnellement au nombre de Mach en tout temps.

4.1.2 Cylindre pressurisé avec générateur électronique

Pendant la réalisation des tests avec le tube à choc, le besoin pour un nouveau montage s'est fait sentir pour trois raisons. Tout d'abord, le tube ne permet pas de tester l'effet d'ondes de choc de courte durée sur le bois, car une pression résiduelle subsiste même après le retour des expansions. Ainsi, il n'est pas possible de prédire un niveau d'efficacité pour d'autre type de générateurs. Ensuite, MARCOK et KURJATKO [1996] ont indiqué que les ultrasons ont davantage d'effet quand ils étaient appliqués simultanément avec une pression statique. Il n'est pas possible de vérifier cette interaction entre les ondes de choc et la pression statique dans le canon, car la chambre basse pression ne peut pas être pressurisée. Finalement, les tests réalisés avec le canon ont permis d'établir des conditions favorisant le traitement. Cependant, ces résultats n'ont pas pu être comparés avec des échantillons traités à l'aide d'une pression statique, le procédé le plus communément employé de nos jours. Le besoin d'une installation de test sous-pression se fait donc sentir.

Identification des des fonctions pour le montage

Lors de la conception, il est important de bien identifier les fonctions que doit remplir le nouvel élément. Dans le cas présent, l'identification des fonctions s'est faite tout d'abord en utilisant la recherche bibliographique, puis grâce à un remue-ménages. Cependant, ces deux étapes ne sont pas suffisantes. Il a été nécessaire d'utiliser une approche plus systématique : l'étude des interacteurs. Tout d'abord, le montage doit permettre d'imprégner le bois avec des résultats statistiquement significatifs. Ensuite, il interagit avec l'opérateur, avec le technicien pour la fabrication, avec les autres membres du laboratoire, avec les échantillons traités, avec la teinture et le système de génération d'ondes de choc. Les fonctions du montage seront donc régies par ces interacteurs. Par exemple, le système doit résister à une exposition prolongée à la teinture et il ne devrait pas importuner outre mesure les autres usages du laboratoire.

Après avoir établi toutes les fonctions, celles-ci ont été classées et placées dans un diagramme que l'on retrouve à la figure 4.4. Ce diagramme facilite la conception en permettant de mieux visualiser les groupes de fonctions. À partir de ce moment, il est possible de commencer la génération de concepts.

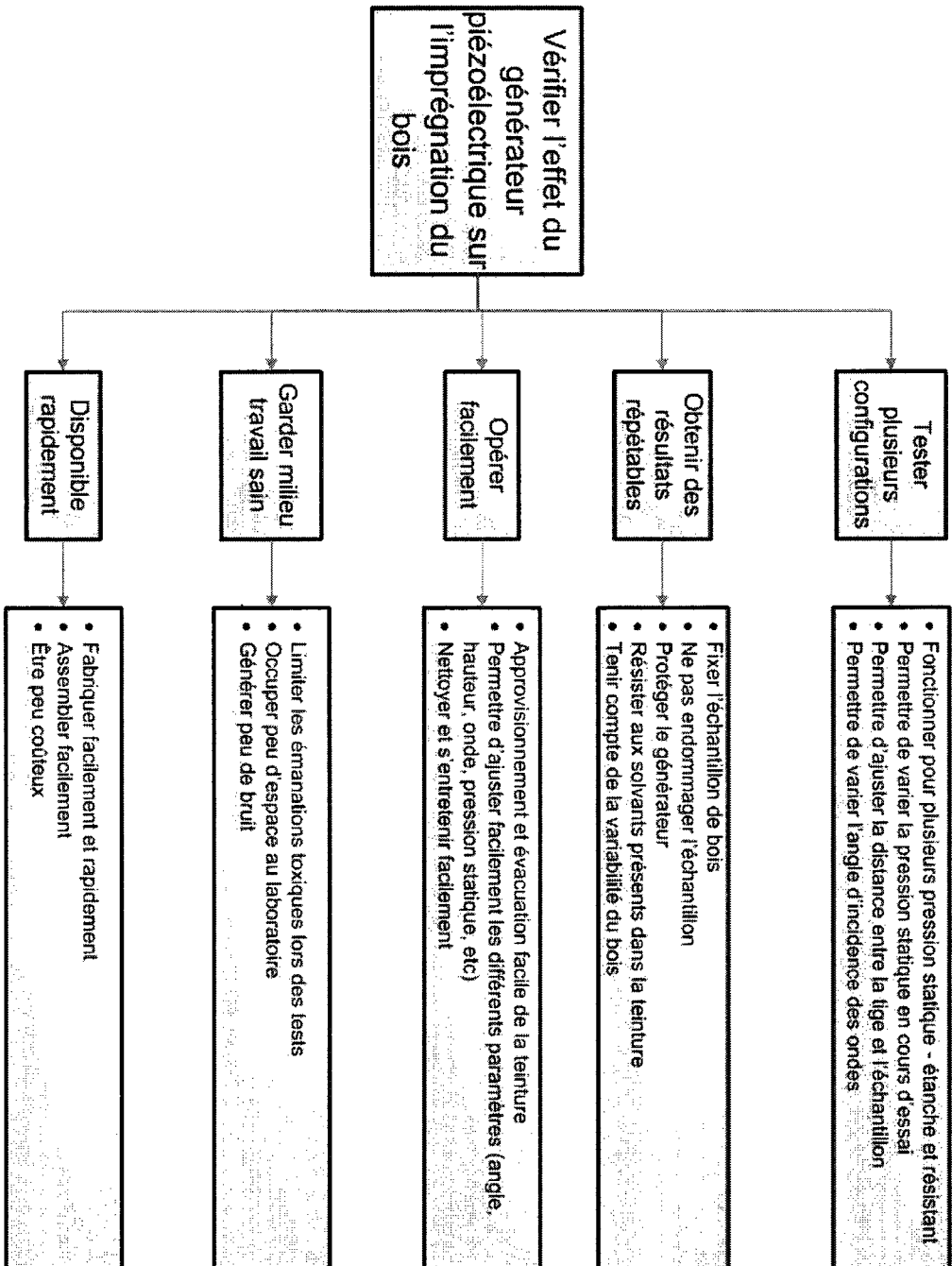


FIG. 4.4: Diagramme des fonctions du montage d'imprégnation sous-pression

Choix de la technologie de génération des ondes

La section 2.4 présente les principales méthodes pour produire des ondes de choc. Parmi celles-ci, les explosifs n'ont pas été retenus à cause des risques et des difficultés reliés à leur utilisation dans le cadre d'un processus industriel. Les décharges sous-marines n'ont pas été retenues non plus parce que les électrodes se dégradent rapidement. En excluant le tube à choc, il reste trois technologies pouvant être utilisées : les lasers, les générateurs électroniques à membrane vibrante et les piézoélectriques.

Après quelques réflexions, un générateur piézoélectrique jumelé à l'amplificateur d'ondes linéaires décrit par DION [2006] sera employé. Plusieurs raisons ont justifié ce choix. Tout d'abord, la technologie est déjà disponible au laboratoire. Ensuite, l'utilisation de l'amplificateur permet de générer une onde de choc plane aussi puissante que les générateurs électromagnétiques à membrane tout en évitant de mettre en contact le générateur avec la teinture. Cette dernière caractéristique facilite l'entretien du système, car les coûteux générateurs piézoélectriques demeurent à l'extérieur de la zone de contrainte. Il serait plus difficile de concevoir des membranes de grande dimension résistant à la teinture et à la pression statique appliquée. Finalement, l'utilisation d'un guide d'onde en aluminium facilite aussi la conception d'un montage étanche.

Ainsi, comme le guide d'onde permet d'obtenir les mêmes caractéristiques d'ondes que les générateurs à membranes tout en étant plus facile à utiliser, c'est donc l'option la plus intéressante. Malgré tout, l'utilisation d'un laser aurait pu être envisagée également. Le générateur piézoélectrique va générer des ondes d'amplitudes comparables au tube à chocs, mais de plus courte durée. D'un autre côté, les lasers permettraient d'obtenir des ondes de beaucoup plus grande amplitude, mais de durée minuscule. C'est un tout autre domaine d'expérimentation qu'il serait intéressant d'explorer ultérieurement.

Concept retenu

La figure 4.5 montre le montage qui a été fabriqué. Tous les dessins de fabrication sont présentés à l'annexe B.

Le montage consiste en un cylindre en acier inoxydable de neuf pouces de hauteur. Le cylindre est fermé à son extrémité inférieure à l'aide d'un bouchon en acier inoxydable muni d'un porte-échantillon (deux modèles possibles selon l'angle d'incidence désiré). Ce bouchon est fixé à l'aide de six boulons 1/4-20 UNC grade 5 et l'étanchéité est assurée à l'aide d'un joint torique numéro 233. Pour sa part, le porte-échantillon est fixé à l'aide d'une tige filletée en acier galvanisé de pas 10-32 UNF. Il est surmonté d'une pince en tôle servant à maintenir les blocs de bois en place (voir la figure 4.6).

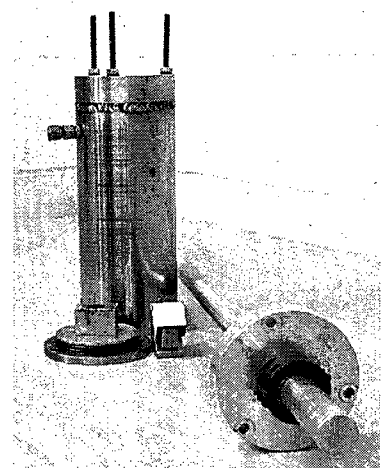


FIG. 4.5: Photo du montage fabriqué pour imprégner le bois à l'aide d'un générateur piézoélectrique

Dans la portion supérieure, le cylindre est fermé à l'aide d'un couvercle soudé muni d'un orifice en son centre. Cette ouverture possède deux usages. Tout d'abord, il est conçu de manière à recevoir guide d'onde en aluminium de un pouce de diamètre. L'étanchéité est assurée par un joint torique numéro 214 placé sur le bouchon. L'orifice servira également à remplir et vider le cylindre de teinture. Une pente a d'ailleurs été usinée sur la face intérieure du bouchon pour faciliter l'écoulement lors de l'évacuation.



FIG. 4.6: Pince servant à maintenir l'échantillon en place dans le cylindre de traitement

Le guide d'onde est maintenu en place par une bague d'épaulement serre-tube achetée sur McMaster (numéro de pièce 8389K21). Cette méthode de fixation a été choisie parce qu'il était important de ne pas modifier la tige d'aucune façon. Ensuite, pour que la pression interne ne propulse pas la tige dans les airs, la bague sera coincée entre le couvercle supérieur et un support en aluminium. Le support est fixé sur le couvercle à l'aide de trois tiges filletées 1/4-20 UNC de grade B7. Ces tiges ont été commandées sur McMaster (pièce numéro 94210A003).

Ce montage est conçu pour résister à une pression de 500 lbf/po², mais avec un facteur de sécurité important (10). Il sera sans doute en mesure de résister à une pression statique bien supérieure.

Test d'étanchéité

L'étanchéité et la résistance du cylindre sous-pression ont été testées à l'aide d'une pompe hydraulique manuelle Énerpac modèle 18 branchée avec un manomètre US Gauge 0-3000 lbf/po².

Pour réaliser le test, la pompe a d'abord été connectée au cylindre par le biais du trou percé pour le pressuriser. Le cylindre a ensuite été rempli d'huile hydraulique ISO AW32 et le système a été purgé de tout son air. Finalement, le tout a été pressurisé à une pression de 1000 lbf/po².

Dans ces conditions, l'intégrité du montage a été préservée. De plus, aucune fuite n'a été détectée sur le cylindre. Cependant, la pression du système diminuait avec le temps, indiquant qu'il y avait une fuite quelque part, mais pas nécessairement sur le cylindre. Cette fuite pourrait donc provenir de la pompe.

En conclusion, la structure et tous les supports peuvent supporter des charges importantes. Le cylindre peut donc être pressurisé jusqu'à une pression de 500 lbf/po² de manière sécuritaire.

4.2 Procédure d'imprégnation du bois

La présente section décrit la procédure à suivre afin d'obtenir les meilleurs résultats possible pour les tests d'imprégnation. Le développement d'une méthode de travail efficace est d'ailleurs une avancée significative de ce projet. Une procédure de test bien définie permet d'augmenter le niveau de confiance par rapport aux résultats, ce qui évite de répéter un trop grand nombre de fois les mêmes expériences.

Cette procédure a beaucoup changé depuis les premiers tests réalisés en janvier 2007, surtout au niveau de la préparation des échantillons. Ainsi, une bonne partie des résultats ont été obtenus dans des conditions différentes de celles présentées ici. Les différences entre la procédure utilisée et celle présentée dans cette section seront décrites pour chaque série de tests à la section 4.5.

Finalement, bien que la procédure décrite dans cette section permette d'obtenir des résultats statistiquement significatifs sur plusieurs paramètres du problème, elle pourrait encore être améliorée afin de réduire la variance des résultats. Il serait possible de mieux contrôler certains paramètres, comme le taux d'humidité du bois et la pénétration du revêtement d'époxy. Maîtriser davantage les résultats est d'ailleurs ce qui permettra d'optimiser le procédé en vue de son industrialisation.

4.2.1 Préparation des échantillons

Tel que présenté à la section 2.2, le bois est un matériau très complexe. Sa perméabilité peut varier beaucoup au sein d'une même espèce de bois, affectant les résultats des tests d'imprégnation. Une préparation adéquate des échantillons permet de contrôler un peu cette variabilité naturelle et, ainsi, d'obtenir des résultats plus répétables.

Tout d'abord, comme le projet vise à améliorer la qualité des planchers de bois franc, les tests seront réalisés principalement sur du bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*, communément appelé merisier). L'imprégnation de deux autres essences de bois à pores diffus, l'érable à sucre (*Acer saccharum*) et le peuplier jaune (probablement *Liriodendron tulipifera*), sera étudiée ultérieurement.

Ensuite, le diamètre réduit du canon à onde de choc permet de traiter seulement des cubes de bois d'environ un pouce de côté. Les cubes d'une même espèce proviennent tous d'une seule planche de bois (pour les échantillons préparés au laboratoire). Pour commencer, la face opposée à la surface traitée est marquée à l'aide de poinçons numérotés. Deuxièmement, les cubes sont découpés à l'aide d'une scie radiale par un technicien qualifié. Idéalement, les blocs devraient être tous de la même dimension. Cependant, comme ce n'est pas vraiment possible, tous les blocs devront être mesurés pour en déterminer la densité. Cette étape se fait lors de la première pesée. Cette pesée se fait quelques jours après la coupe afin que la teneur en humidité des échantillons soit stable.

En troisième lieu, la section 2.2 montre que la perméabilité du bois varie beaucoup, et ce, même pour deux portions d'une même planche. Ainsi, afin de limiter l'effet de ces variations, les échantillons sont regroupés dans des blocs selon leurs caractéristiques macroscopiques (aubier ou bois de cœur, nombre de lignes de croissance, etc.). Traiter les échantillons en blocs devrait réduire le bruit dans les résultats en éliminant la variation entre les blocs. Cette méthode sera efficace pourvu que la variation entre les échantillons d'un même bloc soit plus petite que la différence entre les blocs d'échantillons.

Pour poursuivre, un prétraitement sera appliqué sur certains échantillons pour tenter d'en augmenter la perméabilité. Ce prétraitement s'inspire des travaux de TORGOVNIKOV et VINDEN [2002, 2004] (voir la section 2.2). Dans ce procédé, des micro-ondes endommagent la microstructure du bois en évaporant rapidement l'eau qu'il contient. Cette méthode n'est donc pas applicable lorsque le bois est sec. Dans le cas présent, les échantillons sont humidifiés en les plaçant pendant au moins deux jours dans un pot Mason rempli d'eau. Ils sont ensuite



FIG. 4.7: Échantillon dans leur bocal de trempe après quelques jours. L'eau a pris une teinte jaunâtre.

placés dans un four à micro-ondes Panasonic NN-H665 de 1200 W pendant 40 secondes à intensité élevé, la face à traiter vers le bas. Les échantillons sont finalement séchés à l'air de nouveau avant les tests.

Par contre, la trempe a également un effet sur la perméabilité. La figure 4.7 montre que l'eau a pris une teinte jaunâtre après les deux jours de trempe. Ainsi, l'eau a possiblement retiré des substances hydrosolubles présentes dans le bois. De plus, des traces de moisissure ont été découvertes sur certains échantillons. Comme le mentionnait HANSMANN [2002], ces deux facteurs contribuent à augmenter la perméabilité du bois. Ainsi, l'effet du prétraitement sur la perméabilité sera une combinaison de l'effet de la trempe et des micro-ondes.

Les échantillons trempés présentaient une autre caractéristique intéressante. Après un certain temps, une couche de bulle d'air se forme à la surface de l'échantillon. La présence de cette couche d'air semble confirmer les observations de MYERS [1970]. Dans son brevet, il explique que cette couche de bulle peut grandement réduire l'impact des ondes frappant le bois. Si le même phénomène se produit dans la teinture, l'efficacité de l'imprégnation à l'aide d'onde de choc pourrait être sérieusement compromise.

Finalement, la perméabilité est beaucoup plus élevée dans la direction longitudinale que

radialement. Pour éviter que la teinture pénétrant par les faces transversales ne vienne affecter les mesures de pénétration et d'absorption, les pores sur ces surfaces sont bouchés à l'aide d'un enduit. Les meilleurs résultats ont été obtenus en appliquant deux couches de colles époxy en deux phases Bueler Epo-Kwick. Cet enduit est dégazé après le mélange pour assurer une bonne prise au produit. La colle est ensuite appliquée à l'aide d'un pinceau. Comme le mélange est initialement peu visqueux, il est préférable d'attendre qu'il épaississe avant de l'appliquer. Dans le cas contraire, la colle pourrait théoriquement pénétrer jusqu'au cœur de l'échantillon. Pour finir, les blocs devront sécher pendant au moins 72 heures avant d'effectuer la deuxième pesée.

4.2.2 Utilisation sécuritaire de la teinture

Le produit utilisé pour réaliser les tests d'imprégnation est une teinture à l'huile alcaline pour le bois contenant des solvants organiques volatils, plus particulièrement des essences minérales. C'est donc un produit dangereux. Comme l'expérimentateur sera exposé à ce produit durant de longues périodes de temps dans un endroit peu ventilé, il est très important de suivre les consignes de sécurité fournies dans la fiche signalétique du produit et résumé ici-bas.

1. Produit explosif et inflammable. Doit être rangé dans une armoire appropriée. Éviter d'exposer le produit à une source de chaleur. Un feu peut-être éteint en utilisant des extincteurs de classe B, C et D, mais pas avec de l'eau.
2. Garder le contenant bien fermé quand il n'est pas utilisé.
3. Produit potentiellement dangereux si inhalé ou avalé. S'il n'est pas possible de ventiler suffisamment l'espace de travail, utiliser un demi-masque et des cartouches protégeant contre les vapeurs organiques et les particules.
4. Peut-être nocif pour la peau et les yeux. Le port de gants et de lunettes de sécurités est recommandé.
5. Déchet dangereux. Réutiliser la teinture restante après un test en la filtrant au besoin et placer les résidus dans un contenant hermétique. Contacter le service de santé et sécurité de l'Université pour disposer des restes.

4.2.3 Procédure de test avec le tube à choc

Pour assurer la répétabilité des tests et la sécurité de l'utilisateur, une procédure détaillée a été établie pour opérer le tube à choc.

Avant de commencer un test, il est important de s'assurer que le tube de l'aspirateur est bien en place sur l'évacuation du tube et que l'aspirateur est en marche. Cette installation a pour but de capter les émanations potentiellement toxiques provenant de la combustion de la teinture dans le tube. Il est aussi fortement recommandé de porter des protecteurs auditifs. En général, le canon n'est pas bruyant lorsque l'extrémité du tube est fermée. Cependant, si un choc était généré alors que le tube n'est pas bien fermé, le bruit généré serait suffisamment fort pour endommager les tympans.

Voici maintenant la procédure de tir :

1. Vérifier le bon fonctionnement des capteurs de pression à l'aide de l'indicateur sur le bloc d'alimentation.
2. Ajuster le déclenchement et l'échelle des deux canaux de l'oscilloscope pour bien capter l'onde qui sera générée dans le canon.
3. Placer l'échantillon dans le bouchon et le fixer à l'aide d'un bout de tuyau de latex et démarrer le chronomètre.
4. Remplir le bouchon de teinture.
5. Boucher l'extrémité du bouchon avec du papier cellophane pour limiter la combustion de la teinture.
6. Fixer le bouchon sur le tube. Serrer également les quatre boulons pour comprimer uniformément le joint torique.
7. Choisir et installer une membrane sur le canon.
8. Démarrer le mode d'acquisition *single* de l'oscilloscope.
9. Avant de tirer, vérifier les points suivants :
 - Membrane installée
 - Bouchon bien serré
 - Ajustement de l'oscilloscope adapté au choc à mesurer
 - Déclenchement en mode *single*
 - Aspirateur bien en place et en marche

- Purge du panneau ouverte
- 10. Ouvrir l'alimentation en gaz et fermer la purge. Augmenter progressivement la pression jusqu'à l'éclatement de la membrane ou jusqu'à la pression désirée (utilisation du poinçon).
- 11. Mesurer la vitesse et la pression sur l'oscilloscope.
- 12. Retirer le bouchon.
- 13. Répéter les étapes 5 à 12 pour le nombre de tirs requis en n'oubliant pas de remplacer le cellophane et la membrane
- 14. Laisser tremper l'échantillon jusqu'à ce que le temps de trempe prévu soit atteint.
- 15. Retirer l'échantillon et bien le sécher avec un papier essuie-tout. Placer l'échantillon dans un endroit approprié pour le séchage. Arrêter le chronomètre.
- 16. Nettoyer le matériel ou préparer un nouveau test.

4.2.4 Protocole de test pour le cylindre sous-pression

Comme pour le tube à choc, une procédure a été établie pour opérer le cylindre pressurisé. Cette procédure vise surtout à réduire la variabilité dans les résultats, car ce montage est beaucoup plus sécuritaire que le tube à choc. En effet, il n'est pas bruyant et les émanations toxiques peuvent être confinées dans la hotte, le cylindre étant étanche. Il faut seulement se rappeler qu'il a été testé avec une pression hydraulique maximale de 1000 lb/po². Il ne faut en aucun cas s'approcher de cette valeur lorsque le cylindre est pressurisé à l'aide d'un gaz.

Voici maintenant la procédure suivie :

1. Placer le cylindre sous la hotte pour limiter les émanations de solvant organique.
2. Choisir le support approprié (45 ou 90 degrés) et l'installer sur le bouchon du cylindre.
3. Installer la pince à échantillon sur le support et la fixer à l'aide de ruban adhésif.
4. Placer l'échantillon dans la pince.
5. Fixer le bouchon au fond du cylindre. S'assurer que le joint torique est bien placé et que les boulons sont bien serrés.
6. Mettre la teinture dans le cylindre. Il doit y avoir suffisamment de teinture pour que l'extrémité de la tige soit immergée, mais le niveau doit demeurer sous celui du trou fileté servant à pressuriser le cylindre.

7. Amener le montage près des générateurs. Installer les connecteurs.
8. Installer le guide d'onde sur le montage. S'assurer qu'il est bien fixé à l'aide de la bague d'épaulement et du support en aluminium.
9. Placer les valves selon la configuration requise.
10. Si nécessaire, pressuriser le cylindre. Pour simuler un test de Lowry, une pression de seulement 7 à 8 atmosphère est nécessaire [TSOUMIS, 1991].
11. Partir le générateur d'onde. Le laisser fonctionner 10 minutes à la fréquence désirée.
12. À l'arrêt du générateur, dépressuriser le cylindre. Si nécessaire, placer les valves en configuration vide et actionner la pompe. Conserver le vide pour environ une minute.
13. Retirer le guide d'onde et les connecteurs.
14. Ramener le cylindre sous la hotte et vider la teinture du récipient.
15. Retirer le bouchon du fond
16. Retirer l'échantillon et bien le sécher avec un papier essuie-tout. Placer l'échantillon dans un endroit approprié pour le séchage.

4.3 Protocole de mesure

4.3.1 Mesure de l'absorption

L'absorption est la mesure de la quantité de teinture demeurant dans le bois après le traitement. Sa mesure est la différence entre la densité du bois avant et après l'imprégnation. En fait, comme l'épaisseur des échantillons varie peu, la densité sera en fait une mesure de la quantité de teinture pénétrant dans le bois par unité de surface. La mesure du volume sert donc seulement à corriger la différence de masse en fonction de la taille relative des échantillons, un échantillon plus gros absorbant nécessairement plus de teinture qu'un plus petit.

Pour évaluer la différence de densité, il est nécessaire de connaître trois quantités : la masse des échantillons avant l'imprégnation, leur masse après l'imprégnation et leur volume. Les échantillons seront pesés à l'aide d'une balance Denver Instruments PL 225D. La masse avant l'imprégnation sera mesurée lorsque l'enduit (silicone ou époxy) appliqué sur les faces transversales aura bien séché. Ensuite, avant de mesurer la masse finale, il est nécessaire

d'attendre au moins trois jours après les tests afin que la teinture soit bien sèche, même celle ayant pénétré en profondeur dans le bois.

Pour sa part, le volume ne sera mesuré qu'une seule fois. Les dimensions moyennes des échantillons sont mesurées à l'aide d'un vernier avant d'appliquer l'enduit sur le bois. Ce volume pourra varier ultérieurement (le bois prenant de l'expansion lorsqu'il est humide), mais sans trop d'effet sur les résultats.

Finalement, une attention particulière devra être apportée à deux points lors des mesures. Tout d'abord, la balance est sensible à l'électricité statique. Comme le bois n'est pas conducteur, il est généralement nécessaire de décharger les échantillons à l'aide d'un pistolet anti-statique avant de les peser. La pesée sera aussi grandement influencée par le taux d'humidité ambiant. Effectivement, si l'air est humide, le bois va absorber une plus grande quantité d'eau. Sa masse sera donc plus grande. La figure 4.8 montre d'ailleurs un exemple de variation annuelle du taux d'humidité du bois. Pour éviter que ces variations ne brouillent les résultats, tous les échantillons d'une série de mesure seront pesés au même moment. Ainsi, le taux d'humidité sera invariable au sein d'un bloc, affectant le moins possible les résultats obtenus.

4.3.2 Mesure de la pénétration

Mesure réalisée au CRIQ

Les premières mesures de pénétration ont été réalisées au Centre de Recherche Industrielle du Québec (CRIQ). Ils ont développé une méthode permettant d'évaluer la pénétration lorsque cette quantité est très faible.

Cette méthode de mesure évalue la pénétration à l'aide d'une série de coupes successives de la surface traitée. À chaque étape, quelques millièmes de pouce sont retirés de la surface de l'échantillon à l'aide d'un microtome, simulant en quelque sorte l'usure du bois. L'échantillon est ensuite placé dans un système d'imagerie digitale qui évalue le pourcentage de pixel coloré. À chaque coupe, il y a de moins en moins de pixels colorés dans le bois, ce qui permet d'en déduire une mesure de la pénétration.

Le principal avantage de cette méthode est qu'elle a un bon pouvoir de discrimination. Il est possible de comparer la pénétration obtenue à l'aide des différentes conditions de tests même

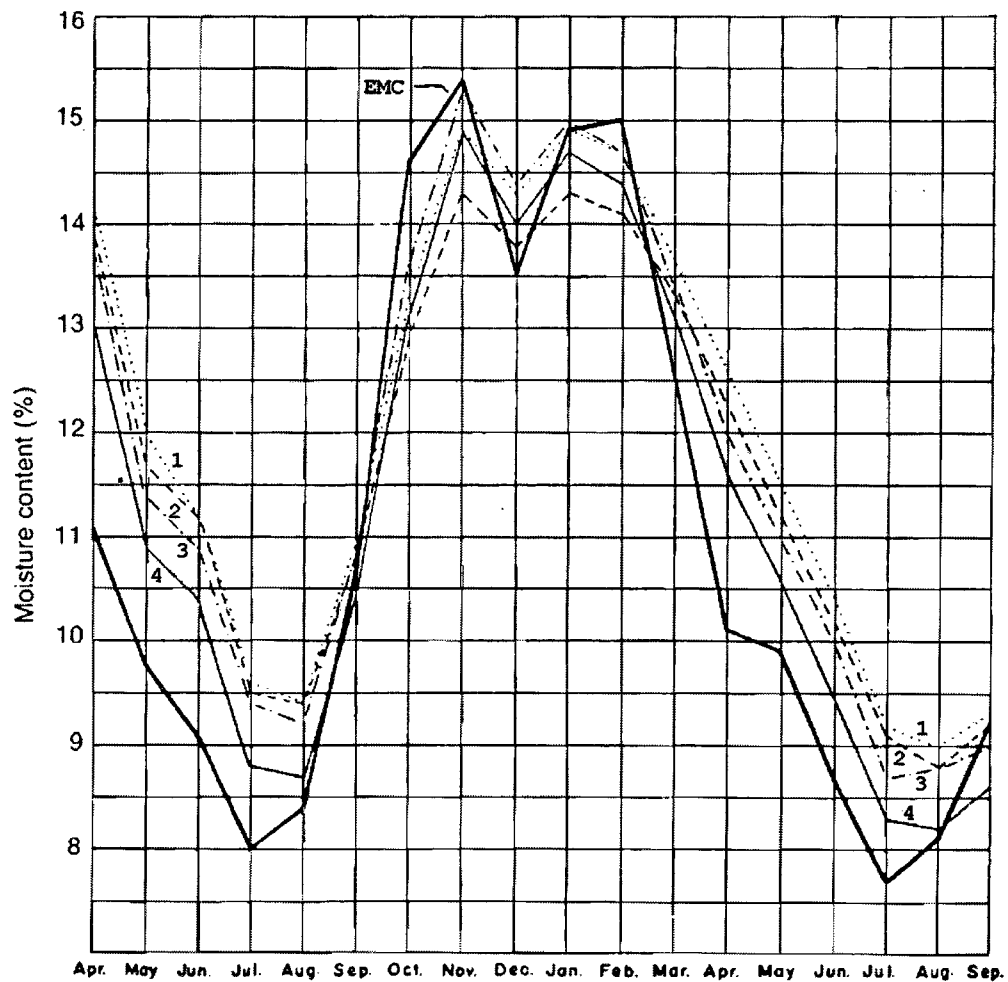


FIG. 4.8: Moyenne mensuelle de la teneur en humidité de différentes essences de bois mesuré sur une période de 18 mois : 1, hêtre ; 2, chêne blanc ; 3, châtaignier ; 4, pin noir et EMC, la valeur estimée de la teneur en humidité. Le lieu où ces valeurs ont été observées n'est pas indiqué [TSOUMIS, 1991].

si la différence de pénétration est faible. C'est donc une excellente méthode pour comparer la pénétration quand celle-ci est de seulement quelques microns. De plus, comme cette méthode mesure la pénétration pour toute la surface traitée, la mesure est moins influencée par les variations locales de perméabilité du bois.

Cependant, cette méthode a comme désavantage le temps requis pour réaliser les mesures. Effectivement, la préparation des coupes et leur analyse demandent un temps considérable. Cette méthode est donc difficilement applicable pour analyser une grande quantité de données. De plus, comme la pénétration est mesurée à l'aide d'incréments et comme la quantité de pixels diminuent progressivement, il est plus difficile de définir la pénétration à l'aide d'un chiffre unique.

Coupe des échantillons au laboratoire

Une deuxième technique de mesure de la pénétration a été introduite en mai 2008 afin d'obtenir des mesures de pénétration plus rapidement. Selon ce nouveau protocole de mesure, la pénétration est mesurée sur une image numérisée d'une coupe transversale des échantillons.

Ainsi, la première étape est de couper l'échantillon en deux pour exposer deux surfaces transversales. Cette coupe est réalisée à l'aide d'une scie à ruban. Toutefois, il est essentiel que la lame soit bien adaptée pour la coupe du bois dur, car une lame à métal brule l'échantillon et rend la surface inutilisable.

Ensuite, les deux coupes transversales sont numérisées en format JPG à une résolution de 1200 dpi. Seulement les niveaux de gris sont conservés. De plus, l'orientation est corrigée à un degré près afin que la surface traitée soit horizontale. Finalement, la pénétration radiale visible sur l'image est rognée afin d'augmenter le contraste. Ces images sont ensuite analysées à l'aide d'un logiciel développé spécialement pour cette application (voir la figure 4.9). Ce logiciel calcule la teinte moyenne à une profondeur donnée et trace l'évolution de la teinte en fonction de la pénétration tangentielle. Cette courbe permet de visualiser le passage de la zone teinte (faible valeur sur la courbe) à la section de couleur originale (niveau de gris plus près du blanc).

Avec ces courbes, il est possible d'établir la pénétration de teinture de manière assez précise lorsque la pénétration est importante. Cependant, la pénétration est plus difficile à établir lorsqu'elle est faible. Pour régler en partie ce problème, l'intersection de la pente initiale et

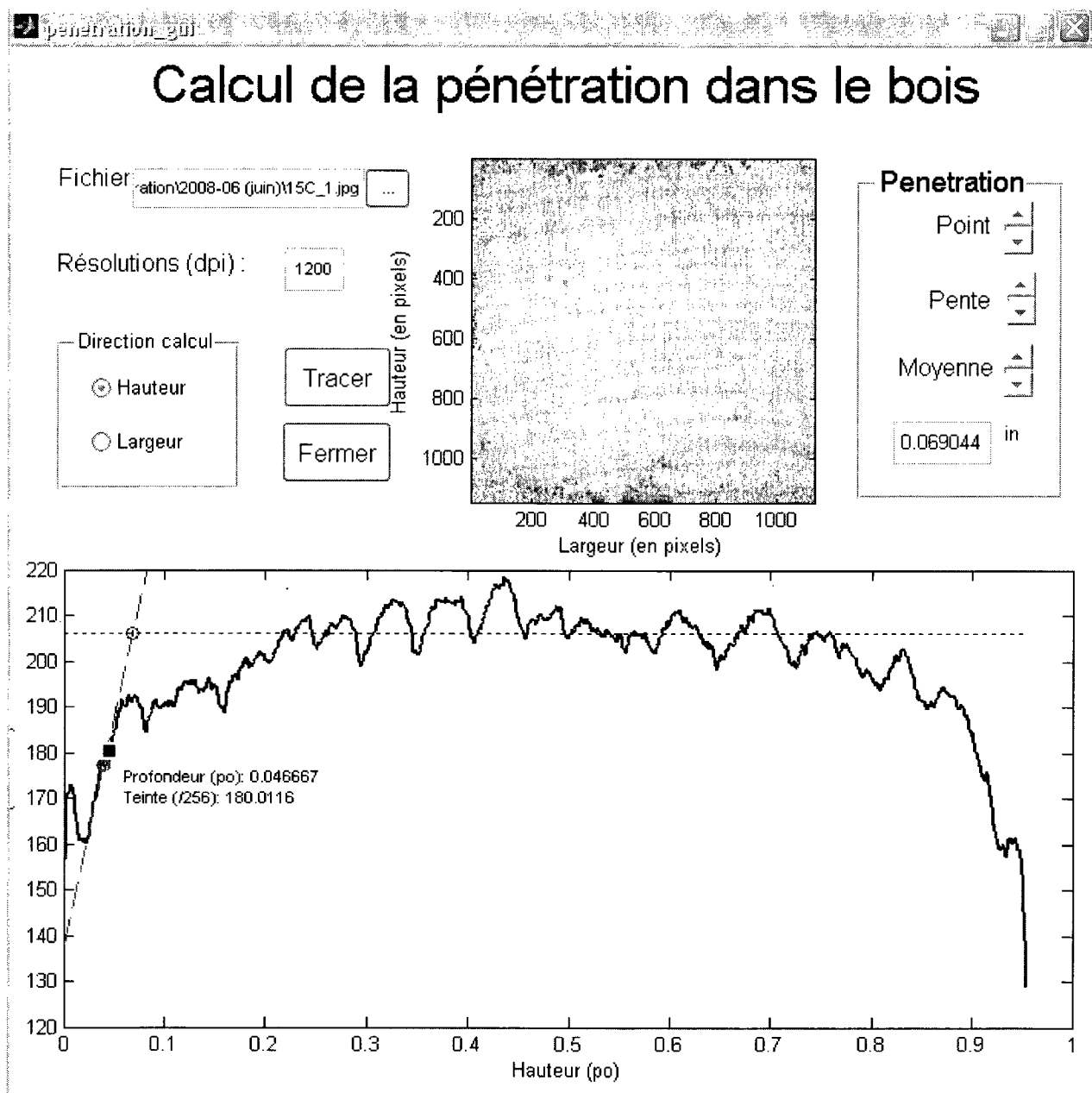


FIG. 4.9: Programme servant à mesurer la pénétration. Tout d'abord, le fichier à analyser est sélectionné. L'image apparaît alors dans la fenêtre prévue à cet effet. Si c'est bien le fichier désiré, l'utilisateur appuie alors sur le bouton «Tracer». Le programme effectue la moyenne des teintes sur une ligne et affiche le tracé à l'écran. Il est alors possible de tracer les droites et d'évaluer la pénétration

de la moyenne de la zone non traitée est considérée comme la mesure de la pénétration. Cette courbe est calculée automatiquement autour d'un point choisi par l'utilisateur. Il peut ensuite modifier cette courbe en changeant le point, la pente et la moyenne manuellement.

Le principal avantage de cette méthode est qu'il permet d'évaluer rapidement l'effet des conditions d'imprégnations sur la pénétration. Effectivement, dès le moment de la coupe, il est possible d'évaluer visuellement l'intérêt des tests. De plus, la pénétration mesurée a une plus grande signification physique que les mesures par incréments.

Finalement, cette méthode permet d'obtenir de très bons résultats quand la pénétration est importante. Cependant, elle est imprécise quand la pénétration est faible. Elle permet de mesurer précisément seulement les différences visibles à l'oeil nu. Sa précision est limitée par deux facteurs principaux : la précision de l'alignement (plus ou moins un degré) et par les résidus de coupe. Effectivement, lors de la préparation des images, la surface de l'échantillon doit être déterminée manuellement. Si l'orientation n'est pas correcte ou si de nombreux résidus de coupe restent à la surface, il est difficile d'établir cette limite précisément.

4.3.3 Mesure de la dureté

Test de Janka

La mesure de la dureté dans le bois est régie par la norme ISO3350 [1975]. Selon cette norme, la dureté du bois est définie par le test de Janka. Ce test consiste à faire pénétrer un poinçon hémisphérique de $5,64 \pm 0,01$ mm de rayon à un rayon de profondeur dans le bois. Avec ces dimensions, la surface de projection est égale à 1 cm^2 . La charge nécessaire pour obtenir cette pénétration est mesurée en Newton. Cette charge sert de mesure de la dureté de l'échantillon. Cette mesure peut finalement être corrigée pour obtenir la dureté au taux d'humidité de référence (12 %).

Modifications apportées au test de Janka pour mesurer la dureté superficielle

Le test de Janka ne pouvait pas être utilisé pour mesurer la dureté des échantillons imprégnés à l'aide du tube à choc. Tout d'abord, le diamètre du poinçon tel que prescrit dans la norme n'est pas une taille de bille standard. Ensuite, cette bille était beaucoup trop grosse pour la taille des échantillons étudiés. Troisièmement, la pénétration requise par la norme (5,64 mm)

ne permet pas d'étudier des variations en surface de la dureté. Finalement, le taux d'humidité des échantillons ne peut être ni contrôlé, ni mesuré à l'aide des équipements disponibles au laboratoire.

Afin de régler ces différents problèmes, une bille de 1/8 de pouce de diamètre a été utilisée comme poinçon. Cette bille est installée dans une cellule de charge Instron de 200 lbf dans un trou percé dans une tôle de 1/16 de pouce (voir la figure 4.10). Le bloc est ensuite placé sur la bille et la compression est amorcée. Une précharge peut-être appliquée sur l'ensemble avant de démarrer le test. Elle n'a pas d'effet significatif sur les résultats.

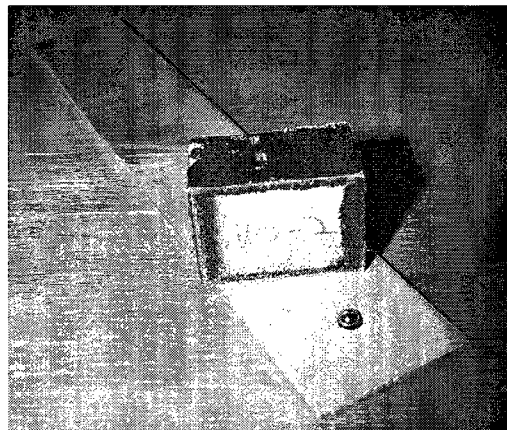


FIG. 4.10: Bille, tôle et échantillon utilisés lors des tests de dureté.

La machine de compression trace l'évolution de la charge dans le temps. Au fur et à mesure que le poinçon pénètre dans le bois, la charge augmente presque linéairement. Quand la bille aura pénétré à une profondeur équivalente à son rayon, le bloc va venir s'écraser contre la tôle. À ce moment, la charge augmentera brusquement, indiquant la fin du test. La rencontre entre les deux zones linéaires (avant et après le contact avec la tôle) indique la charge requise pour obtenir une pénétration de 1/16 de pouce avec ce poinçon. Cette charge est ensuite divisée par la surface projetée pour obtenir une bonne indication de la dureté.

Pour contrôler le taux d'humidité, tous les tests d'une série seront réalisés la même journée. Ainsi, même si le taux d'humidité ne correspond pas à la norme de 12 %, ce taux sera uniforme pour tous les échantillons étudiés.

Pouvoir de discrimination de la méthode de mesure

Avant d'utiliser les résultats du nouveau test de dureté, il est important de vérifier comment la mesure varie à l'intérieur de l'espèce de bois étudié (*Betula alleghaniensis* - bouleau jaune) et comment la dureté de cette espèce se compare à celles d'autres essences de bois dur à pores diffus (la bille utilisée étant trop petite pour mesurer la dureté de bois à zone poreuse comme le chêne). Pour ce faire, la dureté sera mesurée à cinq endroits différents sur une planche de bouleau jaune. Ensuite, la dureté sera également mesurée sur une planche d'érable à sucre (*Acer saccharum*) et de peuplier jaune (probablement *Liriodendron tulipifera*).

Le tableau 4.4 présente les résultats obtenus. Il est possible de voir que les lectures de dureté sont suffisamment différentes entre les espèces pour que le test puisse discriminer ces espèces. Toutefois, les résultats peuvent varier au sein d'une même planche. Il sera donc nécessaire de faire plusieurs mesures et de calculer la moyenne. Ces mesures devront cependant être réalisées la même journée, car la dureté du bois est aussi fonction de son taux d'humidité.

| Bois | Dureté (N) | Janka (N) |
|----------------------|------------|-----------|
| Érable | 575 | 6400 |
| Peuplier | 305 | 2400 |
| Bouleau (min) | 370 | |
| Bouleau (max) | 475 | |
| Bouleau (moyenne) | 400 | 5600 |
| Bouleau (écart-type) | 52 | |

TAB. 4.4: Résultat de tests de validation du nouveau protocole de mesure de la dureté et comparaison les dureté de Janka [USDA, 1999]

4.4 Visualisation de la microstructure

4.4.1 Microscope électronique à balayage (MEB)

Tel que nous l'ont montré MEYLAN et BUTTERFIELD [1972], le microscope électronique à balayage permet d'obtenir de bonnes images de la microstructure du bois. D'ailleurs, MARCOK et KURJATKO [1996] ont utilisé cet instrument pour montrer que l'utilisation d'ultrasons dans le cadre d'un processus d'imprégnation endommage possiblement les ponctuations du bois. Ainsi, le MEB pourrait servir à visualiser les dégâts occasionnés à la microstructure par les ondes de choc.

Méthodologie

Le microscope électronique utilisé dans cette recherche est un microscope Hitachi S-3000W à pression variable. En observant les électrons rétrodiffusés, il est possible de varier la pression de 1 à 270 Pa. Grâce à cela, ce microscope permet d'observer des substances humides et non conductrices comme le bois. Effectivement, l'eau contenue dans la microstructure rend l'obtention d'un vide poussé plus difficile. Ensuite, la présence de gaz réduit l'accumulation

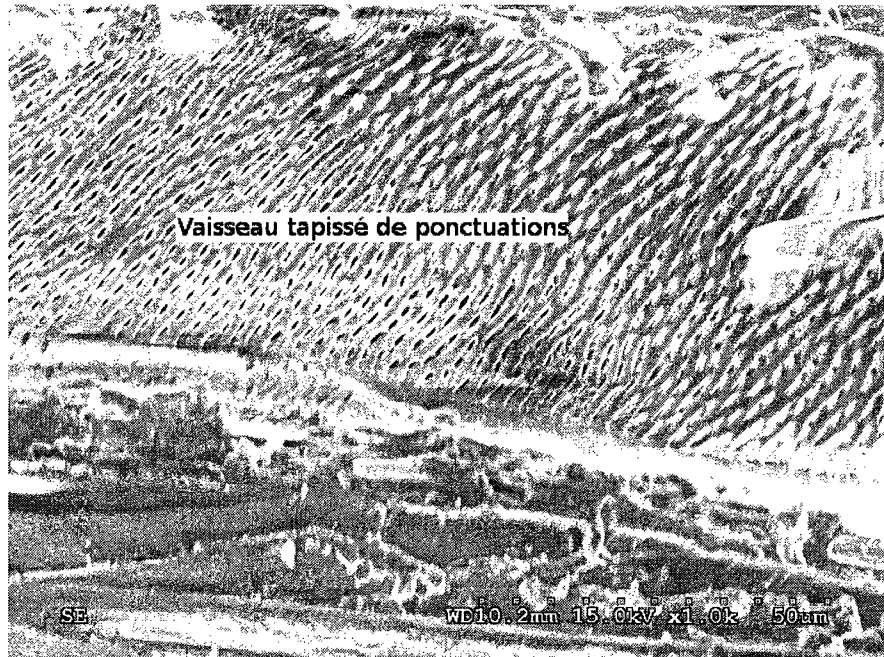


FIG. 4.11: Photo à haute résolution de la surface tangentielle (surface traitée) d'un échantillon de bouleau jaune prise avec un grossissement de 1000X en mode électrons secondaires (vide poussé). Il est possible de remarquer l'effet de charge (luminosité accrue) sur le bord des ponctuations (petites ouvertures) tapissant le fond du vaisseau

de charge électrique sur l'échantillon lors du balayage. Cette accumulation de charges dépend de plusieurs facteurs, principalement de la conductivité de l'échantillon et de la vitesse de balayage (résolution). Comme il est possible de le constater à la figure 4.11, ces charges rendent l'image très brillante à cet endroit, ce qui peut complètement la brouiller.

Une autre considération importante est la préparation des échantillons pour la microscopie. Dans le cas présent, comme l'objectif est d'observer la surface avant et après l'imprégnation, la surface ne sera pas métallisée. Cependant, afin d'améliorer le résultat, un macrotome peut venir enlever une mince couche de bois sur la surface du bois. Le macrotome permet d'obtenir une image plus claire, mais cette opération demande un temps considérable (plusieurs heures pour chaque échantillon). Finalement, les échantillons sont conservés sous vide pendant un certain temps avant l'observation, ce qui permet d'évaporer une bonne partie de l'eau contenue dans la microstructure et donc d'obtenir un vide plus poussé lors de l'observation.

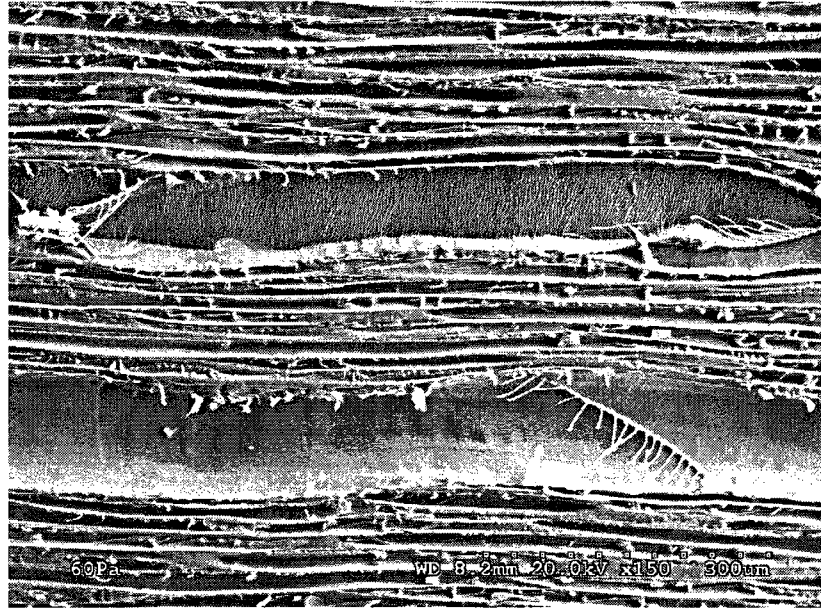


FIG. 4.12: Vue de la face tangentielle d'un échantillon de bouleau jaune en mode électrons rétrodiffusés et avec une pression interne de 60 Pa. Il est possible d'observer deux vaisseaux et plusieurs fibres. Dans le vaisseau du haut, il est possible d'apercevoir les ponctuations intervasculaires, très petites dans le bouleau. Les rayons ne sont pas visibles sur cette image.

Résultats

Les figures 4.12 et 4.13 montrent la face tangentielle d'un échantillon de bouleau jaune provenant du CRIQ. Les ponctuations intervasculaires sont bien visibles sur ces deux images. Leur taille et leur disposition (en file oblique) sont des indices permettant de s'assurer que le bois étudié est bien du bouleau jaune. Cependant, le grossissement n'est pas suffisant pour étudier la marge des ponctuations et observer un éventuel endommagement de la membrane.

La figure 4.14 montre un autre élément permettant de classer le bois : une plaque de perforation scalariforme. Encore une fois, c'est une caractéristique du bouleau jaune.

Finalement, la figure 4.15 montre la limite actuelle des observations. Comme cette image a été prise en mode électrons secondaires, les accumulations de charges étaient très importantes. Il n'était donc pas possible d'augmenter la résolution de l'image. En apportant divers ajustements aux paramètres du microscope, dont la pression partielle, une image plus claire pourrait sûrement être obtenue. Cette opération n'a cependant pas été réalisée pour le moment.

En conclusion, le MEB est un outil d'observation très puissant qui permettrait d'observer

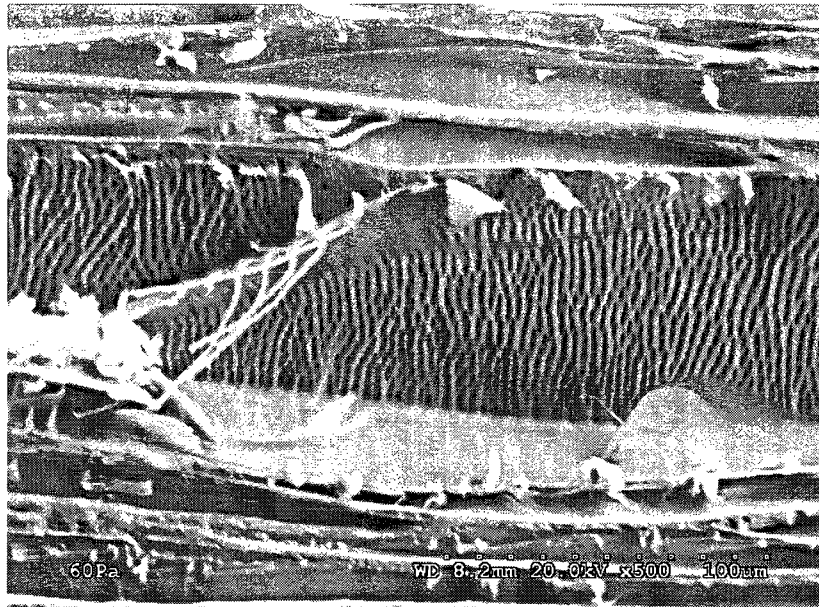


FIG. 4.13: Vue de l'intérieur d'un vaisseau de bouleau jaune prise sur la face tangentielle en mode électrons rétrodiffusés et avec une pression interne de 60 Pa. Cette image montre bien la distribution en file oblique des punctuations intervasculaires dans le bouleau jaune (voir HOADLEY [1990] page 37 et 129).

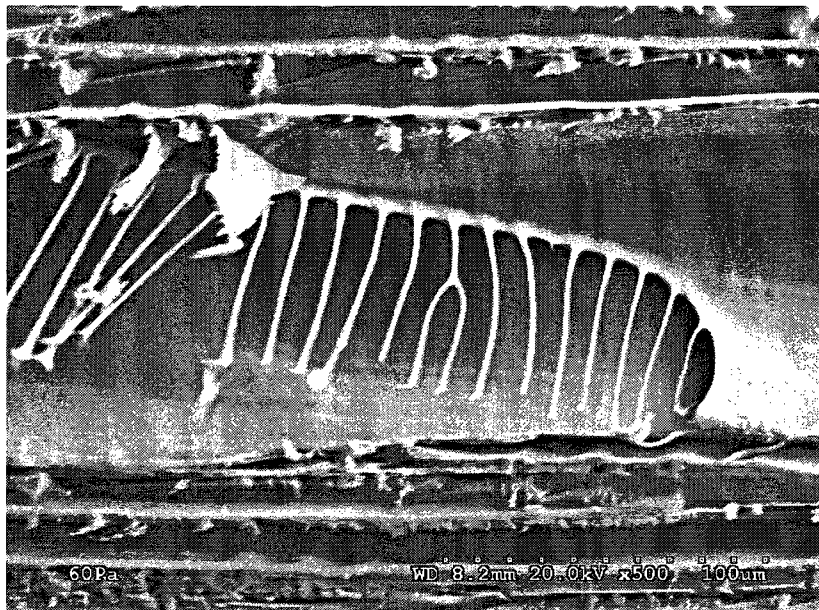


FIG. 4.14: Image montrant une plaque de perforation scalariforme à 60 Pa et en mode électrons rétrodiffusés

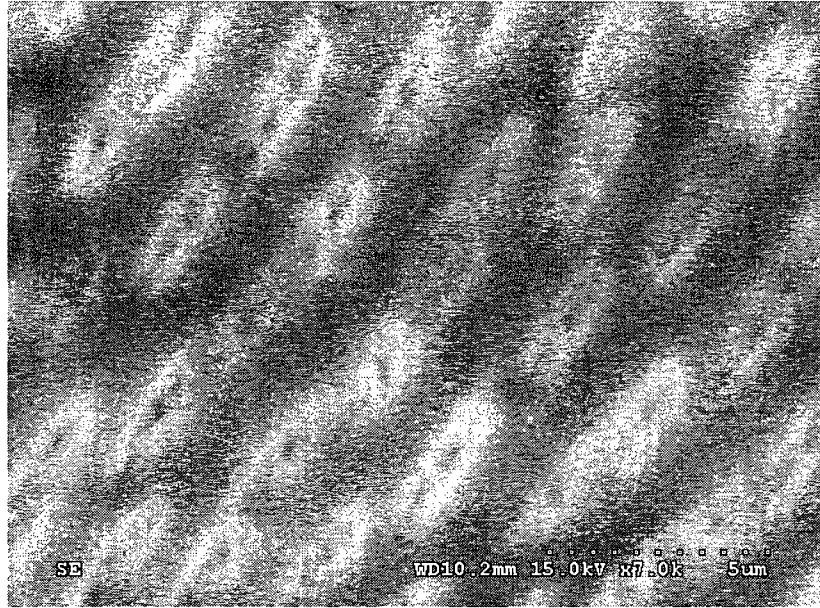


FIG. 4.15: Photo à faible résolution et à fort grossissement (7000X) de ponctuations inter-vasculaires prise sur la face tangentielle en mode électron secondaire.

les dégâts occasionnés aux ponctuations par le procédé d'imprégnation. Cependant, il reste encore beaucoup de travail avant d'en arriver là. Le principal problème est en fait l'accumulation de charge sur le bois. Un plan d'expérience factoriel pourrait être utilisé pour trouver les paramètres optimaux d'observation. Ensuite, si le grossissement n'est pas suffisant pour faire les observations souhaitées sur les ponctuations, il sera alors nécessaire d'altérer l'échantillon pour obtenir les images désirées.

4.4.2 Microtomographe

Le microtomographe est un appareil utilisant des rayons X pour obtenir une vue tridimensionnelle de la microstructure d'un objet. Pour ce faire, l'échantillon est placé entre la caméra et le générateur de rayons X. La caméra capte la quantité de rayons ayant traversé l'échantillon, ce qui permet d'évaluer la densité de matière séparant le générateur de la caméra. En effectuant un balayage sur 180° et en assemblant toutes les images obtenues, il est possible d'établir précisément la position des zones moins denses (lumière du bois) et des zones plus denses (la matière ligneuse).

| Paramètre | Valeur |
|-----------------------|--------------------|
| Caméra | 10 Mp |
| Tension de la source | 40 kV |
| Temps d'exposition | 3534 ms |
| Résolution de l'image | 7,96 μm |
| Filtre | Al 0,5 mm |
| Incrément | 0,330° |
| Nb. répétitions | 2 |

TAB. 4.5: Réglages utilisés pour observer le bois à l'aide du microtomographe

Méthodologie

Le microtomographe utilisé est un appareil Skyscan 1172. Sa résolution maximale est d'environ 2 μm avec le grossissement maximal et la caméra à haute résolution [SKYSCAN, 2008].

Aucune préparation particulière des échantillons n'est requise pour utiliser cet appareil. Ils peuvent être utilisés tels que préparés pour les tests d'imprégnations. Il sera donc possible en théorie de visualiser facilement la microstructure avant et après un test d'imprégnation. Cependant, il a été nécessaire de réduire la taille de l'échantillon lors des tests préliminaires pour augmenter la résolution des images.

Finalement, le tableau 4.5 présente les principaux paramètres utilisés pour observer le bois à l'aide du microtomographe. Ces paramètres pourront être utilisés pour observer d'autres échantillons de bois, mais seulement si l'épaisseur de l'échantillon est la même.

Résultats

Les figures 4.16 à 4.18 montrent la microstructure d'un échantillon de bouleau jaune vu selon les trois plans standard. Sur la coupe transversale (figure 4.16), la distribution des pores et les lignes de croissance (lignes pâles horizontales) sont clairement visibles. Les deux autres vues apportent beaucoup moins d'information. La vue tangentielle montre les vaisseaux, mais pas les rayons, ni les ponctuations. Pour ce qui est de la vue radiale, les anneaux de croissance et les vaisseaux sont visibles. Les rayons semblent se distinguer vaguement du reste. Comme ils sont plus denses, ils apparaissent comme des bandes un peu plus claires sur le sens de la largeur dans la figure 4.18.

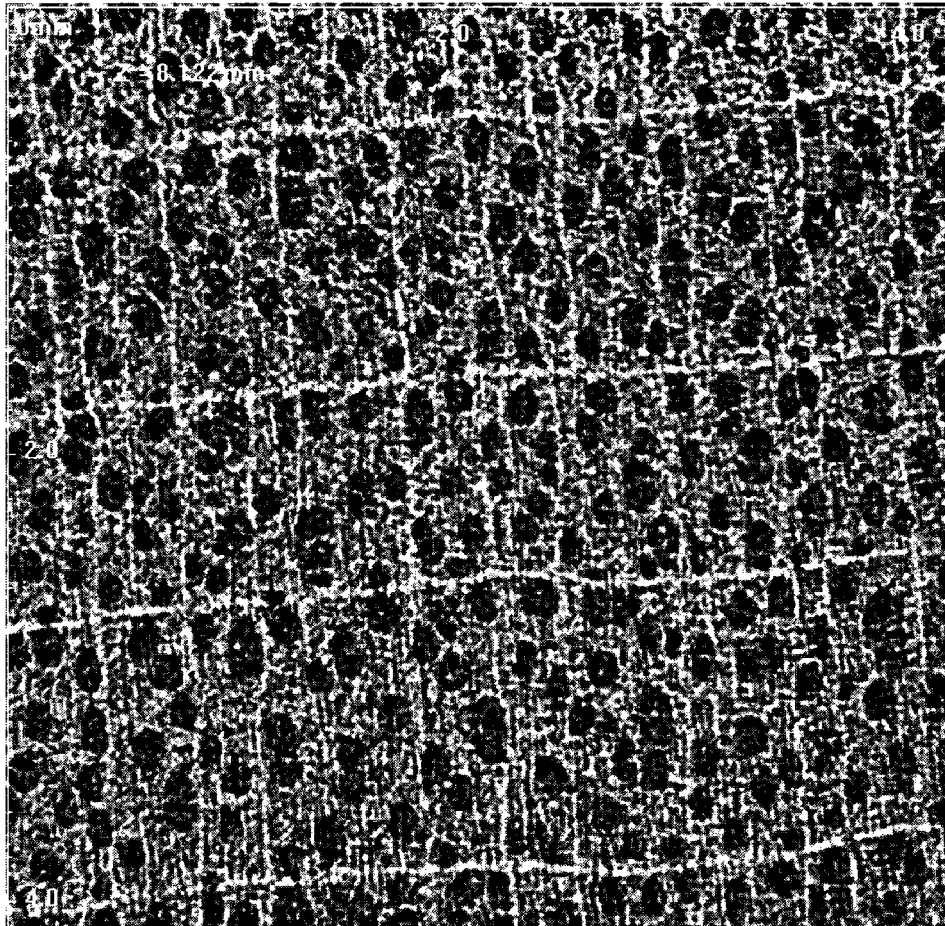


FIG. 4.16: Coupe transversale d'un échantillon de bouleau jaune vue par le microtomographe

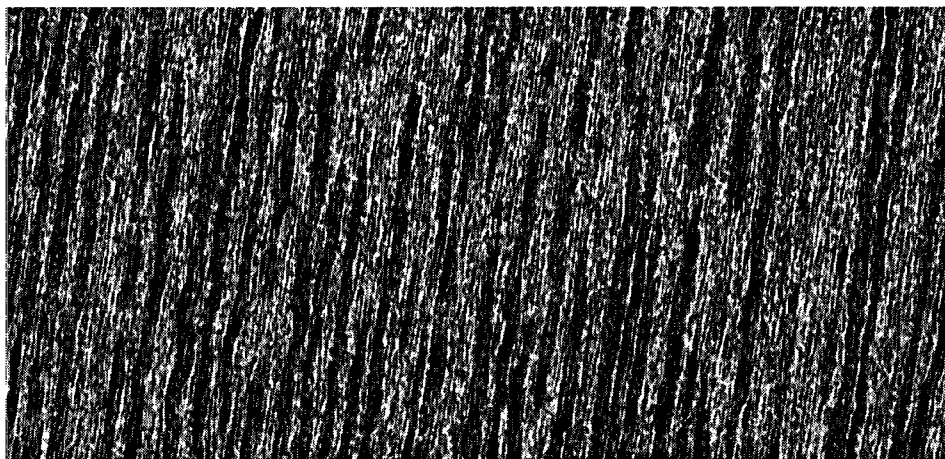


FIG. 4.17: Vue tangentielle d'un échantillon de bouleau jaune vue par le microtomographe

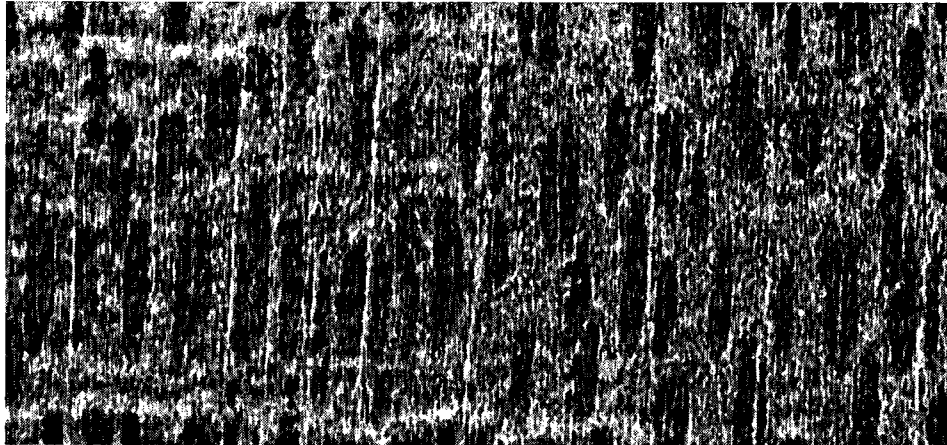


FIG. 4.18: Vue radiale d'un échantillon de bouleau jaune vue par le microtomographe

Ces trois images montrent un des avantages de cette méthode de visualisation. Avec le microtomographe, il est possible d'obtenir rapidement les trois plans principaux à n'importe quel endroit dans l'échantillon. De plus, il est même possible de reconstruire la microstructure en trois dimensions en combinant toutes les images obtenus.

Toutefois, la résolution de ces images n'est pas suffisante pour étudier les dommages occasionnés aux ponctuations. En fait, la résolution n'est même pas suffisante pour bien représenter les fibres, dont le diamètre varie entre 10 et 50 μm . Il serait possible d'augmenter la résolution en travaillant avec un plus petit échantillon, mais il ne serait plus possible de l'utiliser lors d'un essai d'imprégnation. De plus, la résolution maximale de l'appareil n'est pas suffisante pour bien distinguer les ponctuations. L'utilisation d'un nanotomographe, comme le Skyscan 2011, permettrait de résoudre ce problème. Le site du fabricant montre d'ailleurs un très bel exemple d'image pouvant être obtenu avec cet appareil pour du bois avec une résolution de 290 nm [SKYSCAN, 2008].

Malgré tout, l'augmentation de la résolution met en lumière un autre défaut du microtomographe : le temps de calcul. Effectivement, la quantité d'information à traiter est tellement importante qu'il est difficile de travailler sur de grandes portions d'échantillons, et ce, même avec les ordinateurs de bureau les plus performants. Ainsi, bien que l'appareil permette de visualiser de grands échantillons, la puissance de calcul disponible limite la taille des images pouvant être obtenues.

4.4.3 Comparaison des deux instruments

Le microtomographe est un appareil très attrayant du point de vue de l'utilisation. Effectivement, il n'est pas nécessaire de préparer les échantillons et il est possible d'obtenir facilement des images selon les trois plans principaux et plusieurs axes de coupe. Le MEB demande plus d'attention. Il est possible de visualiser une surface sans préparation, mais les résultats sont meilleurs quand la surface est coupée à l'aide d'un macrotome. De plus, l'échantillon pourrait devoir être modifié davantage (tranche fine, métallisation) pour pouvoir augmenter la résolution.

Toutefois, le microtomographe utilisé n'a pas suffisamment de résolution pour observer les ponctuations du bois et les dommages que pourraient occasionner les ondes de choc. De plus, un appareil de plus haute résolution nécessiterait probablement une puissance de calcul trop élevée pour être pratique.

Dans le cas présent, comme un seul plan présente de l'intérêt (la surface traitée) et qu'une résolution importante est nécessaire, le MEB devrait être l'option à retenir. Cependant, il sera nécessaire d'augmenter la résolution de l'image en choisissant les conditions optimales de visualisation et en préparant adéquatement les échantillons.

4.5 Expérimentation

4.5.1 Premier plan d'expérience

Objectif

1. Établir l'importance relative de chacun des paramètres sur l'absorption de teinture.
2. Vérifier l'influence de la série d'échantillons.
3. Valider le protocole de test.

Hypothèses

À cette étape de la recherche, l'hypothèse principale est que les ondes de choc favorisent l'imprégnation du bois grâce à la pression élevée générée par le choc et maintenue pendant

une durée donnée au dessus de la surface. Selon cette hypothèse, les paramètres du choc qui devraient avoir le plus d'impact sont le nombre de Mach, le gaz utilisé et le nombre de tirs. De plus, des essais préliminaires semblent indiquer que la série d'échantillons affecte les niveaux d'absorption mesurés. L'effet de chacun de ces facteurs devrait être le suivant :

1. Comme la pression générée par le choc est la force poussant le liquide dans les pores du bois, son amplitude devrait être un paramètre important. La pression maximale produite est directement fonction du nombre de Mach du choc.
2. Deux gaz sont utilisés pour produire le choc : de l'azote et de l'hélium. L'hélium permet de produire des chocs plus forts que l'azote pour une même pression de gaz. Cependant, lorsque le nombre de Mach et la dimension de la chambre haute pression sont équivalents, la pression maximale est conservée plus longtemps avec l'azote. Ainsi, ce dernier gaz devrait permettre un meilleur traitement.
3. Une augmentation du nombre de tirs augmente la durée totale et donc l'absorption de teinture dans le bois.
4. Tous les échantillons proviennent d'une même planche de merisier (bouleau jaune) et ont été préparés au CRIQ. Cependant, des variations dans la microstructure du bois viennent modifier la perméabilité du bois. Au départ, ces différences étaient supposées petites. Cette série de tests va permettre de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse.

Méthodologie et résultats

Un plan d'expérience factoriel $\frac{1}{2}$ à une seule répétition a été retenu pour réaliser les tests. Ce plan et les résultats numériques sont présentés à l'annexe D. Ensuite, la face transversale des échantillons n'a pas été recouverte d'un enduit (silicone ou époxy). Le liquide était donc libre de pénétrer dans le bois à cet endroit. De plus, les échantillons n'ont pas été mesurés pour en déterminer la densité. Ainsi, la mesure de l'absorption considèrera seulement la différence de masse. Pour poursuivre, les tests ont été réalisés sur deux journées consécutives (12 et 13 juin 2007) pour contrôler le taux d'humidité. Finalement, aucune mesure de la pénétration n'est disponible pour ces échantillons.

Analyse des résultats

Une analyse de la variance a été réalisée sur les résultats à l'aide d'Excel et de Design Expert. Les deux logiciels arrivent au même résultat, soit que le seul facteur significatif est la série

d'échantillons.

Dû au faible nombre de répétitions et à l'influence dominante de la série d'échantillons sur les mesures, il n'est pas vraiment possible de tirer des conclusions claires quant à l'effet des différents paramètres, excepté en ce qui concerne la famille d'échantillons choisie. Ces tests ont permis de réfuter l'hypothèse selon laquelle la série d'échantillons avait une importance négligeable par rapport aux autres paramètres en jeu. De plus, ces tests semblent indiquer que le montage et la procédure de tests sont maintenant au point.

Conclusion partielle

Il faudra porter une très grande attention à la série d'échantillons dans le futur. La variabilité du bois influence grandement les résultats, y compris lorsque le taux d'humidité est le même (tests réalisés sur deux journées. Toutes les conditions de test devront donc être répétées plusieurs fois avant de pouvoir tirer une conclusion sur l'efficacité du traitement.

4.5.2 Étude des effets de deuxième ordre concernant le nombre de tirs

Objectif de l'expérience

Le temps requis pour réaliser un essai d'imprégnation est directement lié au nombre de tirs. Or, il est possible que la première onde de choc augmente la perméabilité du bois [RAO et coll., 2005] et que les ondes subséquentes aient moins d'impact sur la pénétration. Ainsi, cette série de tests servira à évaluer si l'absorption de teinture plafonne entre un et trois tirs pour deux nombres de Mach différents, ce qui pourrait permettre de réduire le temps requis pour réaliser chaque série de tests.

Hypothèses

1. Le nombre de Mach devrait avoir un effet important.
2. Le nombre de tirs devrait affecter significativement l'absorption des cubes de bois à un et deux tirs. Cependant, un troisième tir pourrait ne pas affecter significativement

le résultat. La vérification de cette hypothèse permettrait de vérifier les conditions utilisées par RAO et coll. [2005].

3. L'interaction entre la pression et le nombre de tirs devrait avoir un effet significatif. Un choc plus fort a probablement un effet plus en profondeur sur la perméabilité du bois. Dans ce cas, une troisième répétition pourrait avoir un effet plus important, car la pression n'aurait pas été conservée suffisamment longtemps pour complètement remplir l'espace ouvert par les chocs.

Préparation des échantillons

La méthodologie utilisée pour préparer les échantillons dans cette section est un peu particulière. Tout d'abord, quatre séries partielles d'échantillons de bouleau jaune provenant du CRIQ ont été utilisées. Ensuite, les faces transversales n'ont pas été recouvertes d'un enduit. Finalement, pour contrôler l'humidité, la procédure suivante sera utilisée :

1. Mettre les échantillons de merisier à l'étuve pour une durée d'au moins 24 heures afin d'éliminer l'humidité.
2. À leur sortie de l'étuve, les placer dans un récipient contenant un dessiccant afin de s'assurer que le bois n'absorbe pas l'humidité de l'air.
3. Peser chaque échantillon pour obtenir sa masse initiale. La première lecture est la bonne, car le bois absorbe l'humidité de l'air et s'alourdit.
4. Replacer l'échantillon dans le récipient en attendant les tests.

À la fin des tests, les échantillons seront également placés à l'étuve afin de revenir au taux d'humidité de référence. Les tests ont aussi été réalisés sur deux jours (25 et 26 octobre 2008).

Conditions retenues pour les tests

Le premier facteur étudié est le nombre de Mach et il pourra prendre deux niveaux différents (1,75 et 2,5). Pour sa part, le nombre de tirs pourra être de 1, 2 ou 3. Tous les chocs ont été générés à l'aide d'hélium et la longueur de la chambre haute pression est fixée à son maximum. Chaque condition de tests sera répétée trois fois et les échantillons seront séparés en trois blocs. Le plan d'expérience et les résultats numériques sont présentés à l'annexe D.

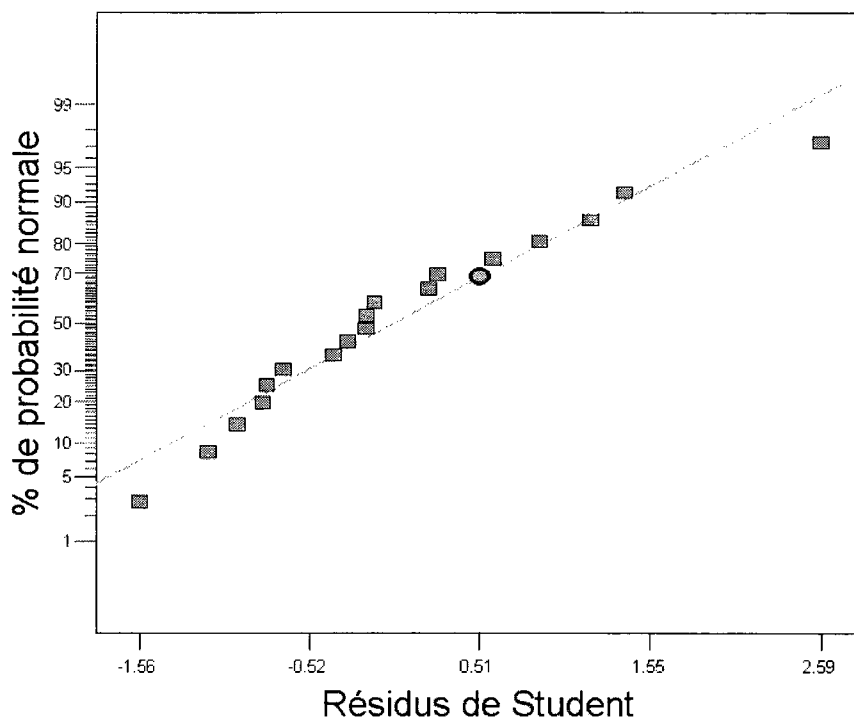


FIG. 4.19: Distribution normale des résidus de Student sans aucune transformation des données

Analyse des résultats

Avant d'utiliser les résultats d'une analyse de la variance, il est important de vérifier que les hypothèses sous-jacentes sont vérifiées [MONTGOMERY, 2005] :

1. Les résidus (différence entre la valeur mesurée et la valeur prédite) sont normalement distribués
2. La variance est constante.

Dans le cas présent et comme montrée à la figure 4.19, la variance n'est pas uniformément distribuée. Tel que présenté par MONTGOMERY [2005], cette situation peut-être corrigée par une transformation des données. Ainsi, en utilisant l'inverse des résultats d'absorption (forme $\frac{1}{y}$), les deux hypothèses de l'analyse de la variance peuvent être vérifiées.

Maintenant, le tableau 4.6 présente les résultats de l'analyse de la variance après la transformation des données. Tout d'abord, on y remarque que les blocs ont une influence importante. Ils enlèvent une portion significative de l'erreur, permettant d'obtenir de meilleurs résultats.

| Paramètres | DDL | Moyenne des carrés | F | Prob. erreur |
|--------------|-----|--------------------|-------|--------------|
| Bloc | 2 | 12,41 | | |
| Nb. Mach (A) | 1 | 4,411 | 24,19 | 0,06% |
| Nb. tirs (B) | 2 | 3,303 | 18,12 | 0,05% |
| AB | 2 | 0,7310 | 4,009 | 5,26% |
| Résidus | 10 | 0,1823 | | |
| Total | 17 | | | |

TAB. 4.6: Résultats ANOVA après la transformation $1/y$ de l'étude de la courbure sur le nombre de tir

Toutefois, il semble y avoir un lien entre l'absorption des échantillons et leur masse initiale (voir la figure 4.20).

En corrigeant les données en fonction de leur masse initiale (analyse de la covariance), il est possible d'obtenir d'aussi bons résultats qu'avec la correction des données par bloc (voir le tableau 4.7). Ainsi, comme l'absorption est plus importante dans les échantillons plus légers, il est possible de conclure que la taille de l'échantillon ou sa densité (relié à la porosité) influence la quantité de liquide absorbé. Il est important de se rappeler ici que le taux d'humidité est constant dans cette série de tests (séchage à l'étuve).

| Paramètres | DDL | Moyenne des carrés (ajustée) | F | Prob. erreur |
|--------------|-----|------------------------------|-------|--------------|
| Masse ini. | 1 | 24,50 | 126,0 | 0,00% |
| Nb. Mach (A) | 1 | 5,342 | 27,47 | 0,00% |
| Nb. tirs (B) | 2 | 3,537 | 18,19 | 0,00% |
| AB | 2 | 0,5251 | 2,70 | 11,1% |
| Résidus | 11 | 0,195 | | |
| Total | 17 | | | |

TAB. 4.7: Résultats ANOVA obtenue sur le logiciel Minitab après la transformation $1/y$ de l'étude de la courbure sur le nombre de tirs. Les absorptions ont été corrigées en fonction de leur masse initiale, et non en fonction des blocs.

Ensuite, comme le montre les tableaux 4.6 et 4.7, le nombre de Mach a bel et bien un effet significatif sur l'absorption. Toutefois, l'effet du nombre de Mach dépend du nombre de tir et doit donc être étudiée avec prudence.

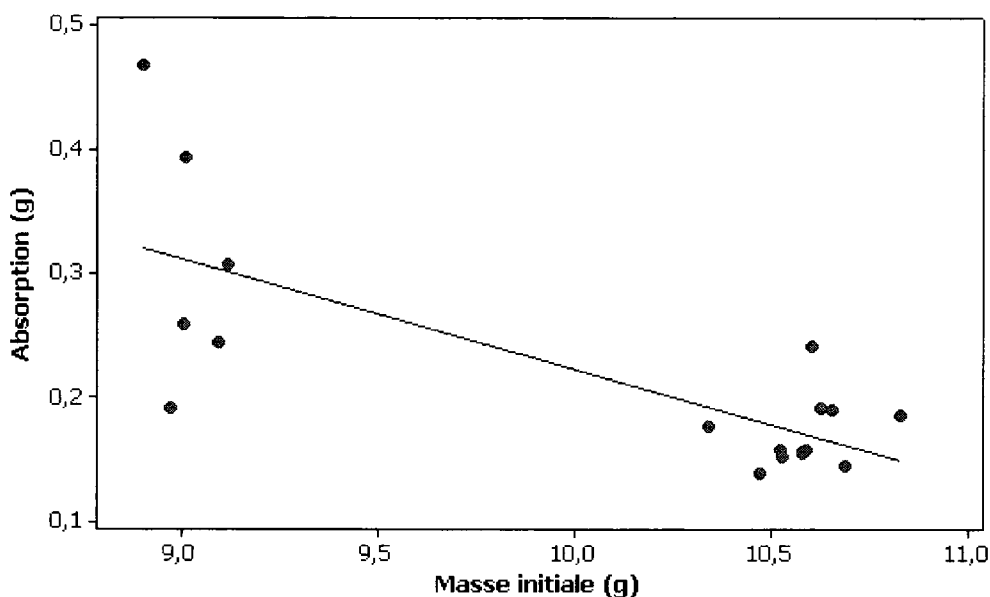


FIG. 4.20: Variation de l'absorption en fonction de la masse initiale des échantillons traités

Les figures 4.21 et 4.22 permettent d'étudier l'effet du nombre de tir et de l'interaction. Ainsi, peu importe le nombre de Mach, un deuxième tir augmente l'absorption de teinture dans le bois. L'effet d'un troisième tir est lui différent pour les deux cas. Pour un nombre de Mach de 1,75, le troisième tir semble nuire à l'absorption de teinture. L'effet inverse se produit avec un nombre de Mach de 2,5. Cependant, la différence entre ces deux cas est peu significative. Davantage de tests seraient nécessaires pour confirmer ce comportement.

Conclusion partielle

L'effet du nombre de tirs semble bel et bien plafonner après deux répétitions. Cependant, l'atteinte de ce plateau pourrait dépendre du nombre de Mach du choc, qui est toujours un paramètre important dans cette analyse. L'importance de l'interaction semble cependant dépendre beaucoup du nombre de tirs. Davantage de tests sont nécessaires afin de confirmer ces résultats, surtout qu'aucun recouvrement n'a été placé sur la surface transversale des échantillons.

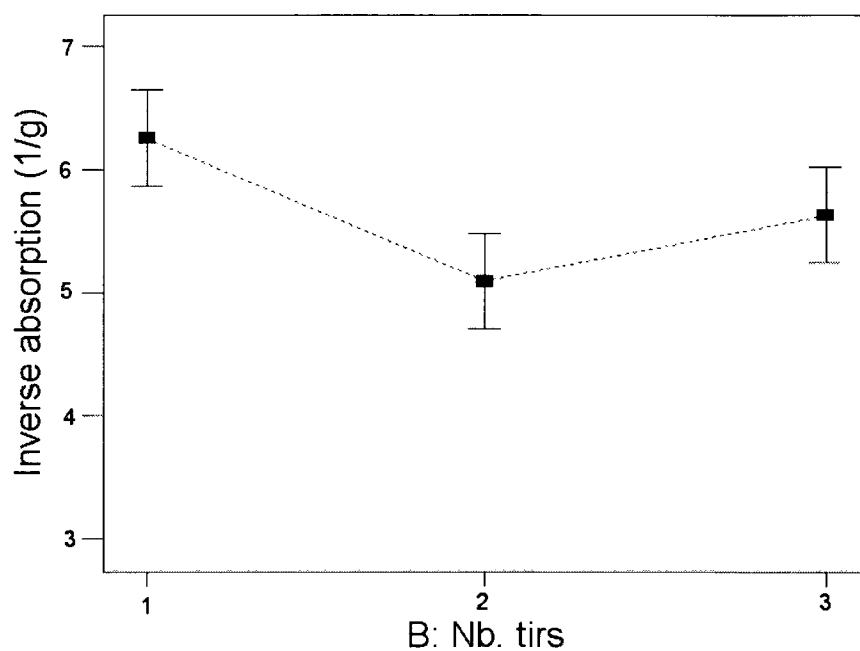


FIG. 4.21: Inverse de l'absorption de teinture en fonction du nombre de tirs en utilisant un nombre de Mach de 1,75.

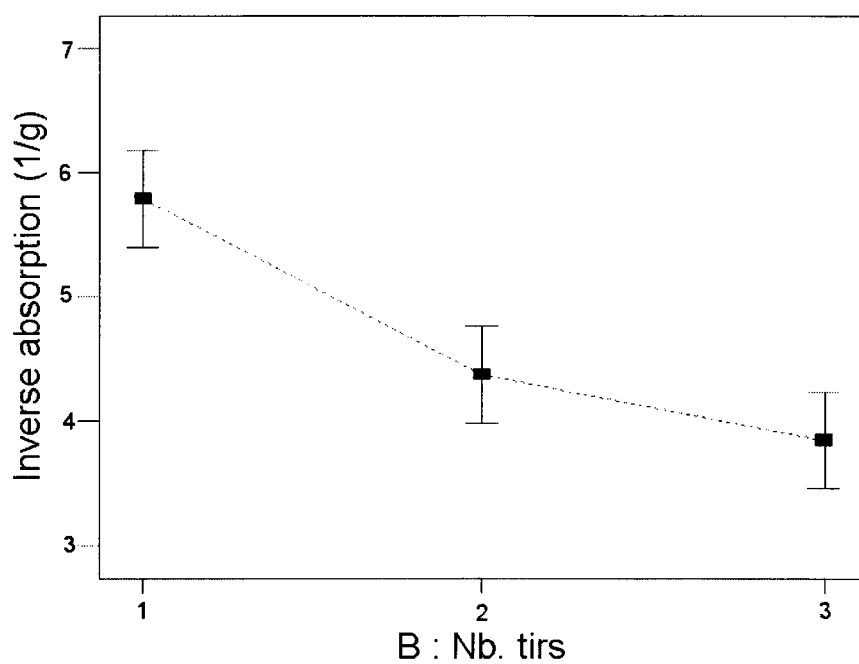


FIG. 4.22: Inverse de l'absorption de teinture en fonction du nombre de tirs en utilisant un nombre de Mach de 2,5.

4.5.3 Plan d'expérience complet à 4 facteurs

Les tests précédents ont permis d'établir les principaux paramètres influençant l'absorption de teinture et de mieux comprendre leur effet. Toutefois, l'effet de la durée est encore indéterminé. De plus, la pénétration n'a pas été mesurée lors des tests précédents. Finalement, quelques auteurs ont fait mention que la présence de bulles de gaz dans le liquide pouvait interférer avec les ondes de choc. Il serait intéressant de vérifier expérimentalement cette déclaration.

Les tests présentés dans cette section devraient donc venir confirmer les résultats des études précédentes grâce à une meilleure préparation des échantillons et à davantage de répétition de chaque condition. Ce seront également les derniers tests réalisés avec les échantillons préparés au CRIQ.

Paramètres étudiés

Lors de cette série d'essai, quatre paramètres seront étudiés : la durée (A), le nombre de Mach (B), le nombre de tirs (C), et le fait de dégazer ou non la teinture avant les tests (D).

Tous les chocs seront générés avec de l'hélium. Les nombres de Mach retenus sont 2,01 (mylar 3) et 2,86 (mylar 5-7). Le nombre de tirs variera entre 1 et 3. Pour ce qui est de la durée, elle sera contrôlée beaucoup plus précisément que pour les tests précédents en modifiant la longueur de la chambre haute pression. Les durées étudiées ont été choisies pour réussir à limiter le plus possible ces changements. Ainsi, la durée maximale sera celle pouvant être obtenue avec les dimensions maximales de la chambre pour un choc de Mach 2,01. Cette durée sera établie à l'aide du code de tube à choc présentée à la section 4.1.1. Avec le même code, il sera possible d'établir la longueur de la chambre permettant d'obtenir la même durée avec un choc à Mach 2,86. Finalement, la durée minimale sera celle pouvant être obtenue pour un Mach de 2,01 avec la longueur qui vient d'être calculée. Le tableau 4.8 résume cette démarche.

Finalement, cette série d'essais permettra aussi d'étudier de nouvelles réponses. Ainsi, la pénétration mesurée au CRIQ et celle mesurée au laboratoire s'ajouteront à l'absorption dans la liste des facteurs mesurés, permettant d'obtenir un meilleur portrait de l'effet des chocs sur l'imprégnation.

| Mach | -1 | 0 | 1 |
|----------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 2,01 | 0,425 m 74 μs | 0,5 m 207 μs | 0,5715 m (max) 334 μs |
| 2,40 | 0,365 m 78 μs | 0,435 m 207 μs | 0,505 m 337 μs |
| 2,86 | 0,295 m 73 μs | 0,36 m 203 μs | 0,425 m 333 μs |
| Moyenne | 75 μs | 205 μs | 335 μs |

TAB. 4.8: Calcul des longueurs de la chambre haute pression pour la réalisation des tests

Hypothèses

1. Les études précédentes semblent montrer que la durée à un effet plus petit que les autres paramètres dans la plage de valeur étudiée. Or, la durée n'a jamais été contrôlée précisément. La présente étude cherchera donc à établir plus précisément l'effet de la durée sur l'absorption et la pénétration de la teinture.
2. Tout comme dans les études antérieures, le nombre de Mach et le nombre de tirs devraient avoir un effet important sur l'absorption. Ces deux facteurs devraient également favoriser la pénétration de la teinture.
3. De nombreux auteurs, dont MYERS [1970] et NAIR et SIMONSEN [1995], affirment que la présence de bulle dans le liquide et à la surface du bois peut grandement réduire l'effet des ondes incidentes sur l'imprégnation. Ainsi, le fait de dégazer préalablement la teinture devrait augmenter la puissance de l'onde frappant la surface du bois et, donc, la pénétration et l'absorption.

Méthodologie

Dans cette section, les tests ont été réalisés séquentiellement à l'aide d'un plan d'expérience factoriel complet à quatre facteurs séparé en deux blocs. Comme le design est séparé en deux, il ne sera pas possible de conclure sur l'effet de l'interaction quadruple (ABCD), dont l'effet sera confondu avec celui des blocs [MONTGOMERY, 2005]. Des points centraux (deux par blocs) seront ajoutés au design pour évaluer l'erreur expérimentale et la courbure.

La procédure de préparation des échantillons se rapproche maintenant de la méthode décrite à la section 4.2.1. Au départ, des échantillons en série de dix provenant du CRIQ seront utilisés. La pénétration de ces échantillons sera mesurée au CRIQ. Les deux derniers blocs utiliseront

des échantillons préparés et analysés au laboratoire. Les deux surfaces transversales de tous les échantillons seront recouvertes de silicone pour bloquer la pénétration longitudinale de teinture.

Pour cette série de test, le bois n'a pas été séché à l'étuve. L'effet de l'humidité n'est pas encore bien établi. En conséquence, il a été jugé préférable de laisser le taux d'humidité varier en fonction des conditions ambiantes plutôt que de toujours traiter du bois très sec.

Comme le plan d'expérience sera progressivement augmenté selon le besoin, la date des tests (et la teneur en humidité du bois) variera entre chaque série. Cependant, chaque bloc sera testé sur une seule journée. C'est pourquoi l'humidité n'affectera pas les résultats au sein d'un même bloc. Ainsi, s'il n'y a pas d'interaction entre le taux d'humidité et les autres facteurs, l'effet de l'humidité sur l'imprégnation sera enlevé en même temps que l'effet de la série d'échantillons par le biais des blocs.

Finalement, afin de s'assurer que le temps de trempe ne vient pas affecter les résultats, ce paramètre sera fixé à 25 ± 5 minutes pour tous les tests, et ce, peu importe le nombre de tirs. De plus, le nombre de Mach réel du choc sera mesuré pour chaque test et ce résultat sera utilisé pour l'analyse du plan d'expérience.

Réalisation des tests

La première série d'échantillons (groupe 11) a été testée le 15 février 2008 et la seconde (groupe 14) le 19. Une répétition additionnelle du plan d'expérience a été réalisée le 5 mars (groupe 12) et le 18 mars (groupe 13). Une troisième répétition a été réalisée à la fin du mois de mai (22 et 23) avec les échantillons des groupes 16 et 15. La pénétration des deux dernières séries a été mesurée au laboratoire afin de valider la nouvelle méthode de mesure.

Au final, le plan d'expérience a été répété 3 fois, pour un total de 6 blocs et 53 échantillons testés. Toutefois, certains points centraux ont été omis lorsque le temps manquait ou quand un point factoriel devait être repris. Certains échantillons ont été écartés également parce qu'une membrane a éclaté beaucoup trop tôt ou parce que le cylindre a été pressurisé sans qu'aucune membrane soit présente.

Résultat des tests d'absorption

Le plan d'expérience, ainsi que tous les résultats numériques d'absorption et de pénétration, est présenté à l'annexe D.

Concernant l'absorption, le tableau 4.9 montre le résultat de l'analyse de la variance des six séries d'échantillons. Les facteurs non significatifs qui ne préservent pas la hiérarchie ont été enlevés pour améliorer le modèle. Toutefois, la présence de deux interactions triples significatives donne de l'importance à presque tous les paramètres.

| Paramètres | DDL | Moyenne des carrés | F | Prob. erreur |
|--------------|-----|--------------------|------|--------------|
| Bloc | 5 | 0,025 | | |
| Durée (A) | 1 | 9,24E-3 | 0,31 | 58,2% |
| Nb. Mach (B) | 1 | 0,014 | 46,8 | <0,01% |
| Nb. tirs (C) | 1 | 0,015 | 51,3 | <0,01% |
| Dégazage (D) | 1 | 2,79E-4 | 0,94 | 34,2% |
| AB | 1 | 1,43E-3 | 4,83 | 3,99% |
| AC | 1 | 3,35E-3 | 11,4 | 0,31% |
| BC | 1 | 1,98E-3 | 6,69 | 1,77% |
| BD | 1 | 5,57E-4 | 1,89 | 18,5% |
| CD | 1 | 1,29E-4 | 0,44 | 51,7% |
| ABC | 1 | 2,83E-3 | 9,59 | 0,57% |
| BCD | 1 | 0,01 | 34,6 | <0,01% |
| Résidus | 20 | 2,95E-4 | | |
| Total | 37 | | | |

TAB. 4.9: Résultats ANOVA pour les mesures d'absorption dans le plan d'expérience complet à 4 facteurs

La présence de ces interactions triples constitue d'ailleurs une surprise. Effectivement, il est plutôt rare d'observer des interactions d'ordre plus grand que deux dans un processus expérimental. C'est d'ailleurs sur cette hypothèse que se basent les plans factoriels fractionnaires. Ces interactions compliquent d'ailleurs grandement l'analyse du problème, tous les facteurs devant être analysés simultanément pour trouver les conditions optimales.

Ensuite, le tableau 4.9 permet d'identifier les paramètres ayant le plus d'influence sur le système. Il s'agit du nombre de Mach du choc (B), du nombre de tirs (C) et de l'interaction entre ces deux paramètres et la teneur en gaz de la teinture (ABD).

Les figures 4.23 et 4.24 montre l'effet de ces trois facteurs. On y remarque que les meilleurs résultats sont obtenus avec trois tirs et un nombre de Mach de 2,72 et quand la teinture n'est pas dégazée. Le dégazage permet d'améliorer légèrement l'absorption avec trois tirs de faible intensité ou un tir plus puissant. Toutefois, il réduit l'absorption avec un seul tir de faible intensité ou trois tirs puissants, ce qui est assez étrange.

Ensuite, cette série de tests a finalement permis de détecter l'effet de la durée sur l'absorption. Toutefois, la durée, comme le dégazage, n'a pas d'effet significatif en elle-même. En observant attentivement le tableau 4.9, il est possible de remarquer que l'effet de la durée se manifeste via les interactions AB, AC et ABC.

Les figures 4.25 et 4.26 montrent l'effet de ces interactions pour de la teinture non dégazée. Il est possible de remarquer que la durée et le nombre de tirs n'ont pas d'effet pour un choc de faible amplitude. Avec trois chocs de grande amplitude toutefois, une augmentation de la durée a un effet positif sur l'absorption.

Résultats des tests de pénétration réalisés au CRIQ

Le CRIQ a mesuré le pourcentage de pixels colorés à 10 millièmes et à 30 millièmes de pouce de profondeur pour les quatre premières séries d'échantillons. Les résultats numériques sont présentés à l'annexe D.

Parmi tous les paramètres étudiés, deux facteurs affectent la quantité de teinture pénétrant à 10 millième de pouce dans le bois : le nombre de tirs et l'interaction entre le nombre de tirs et le nombre de Mach. Ainsi, l'analyse de la variance permet d'affirmer que la probabilité que le nombre de tirs n'affecte pas la quantité de teinture présente à 10 millième pouce est de seulement 0,11% et cette probabilité est de 8,65% pour l'interaction. Le nombre de Mach en lui-même n'est pas significatif (probabilité de 95,5%). L'effet de ces deux facteurs est illustré à la figure 4.27.

À 30 millièmes de pouce de profondeur, le nombre de tirs est encore significatif. La probabilité que C n'ait pas d'effet est de seulement 0,24%. Cependant, un autre facteur semble modifier la pénétration à cet endroit : la teneur initiale en gaz de la teinture (probabilité d'erreur de seulement 0,33%). Le fait de dégazer la teinture semble nuire à la pénétration, ce qui semble confirmer les résultats obtenus à l'aide des mesures d'absorption.

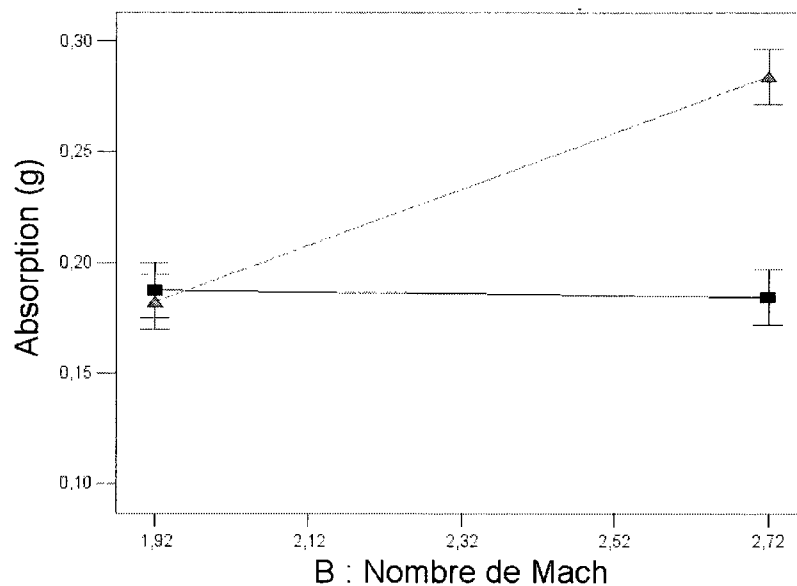


FIG. 4.23: Interaction entre le nombre de Mach (B) et le nombre de tirs (C) lorsque la teinture est utilisée telle quelle. La courbe avec des marqueurs carrés représente 1 tirs alors que la courbe utilisant les triangles est pour 3 tirs. La durée prend une valeur moyenne.

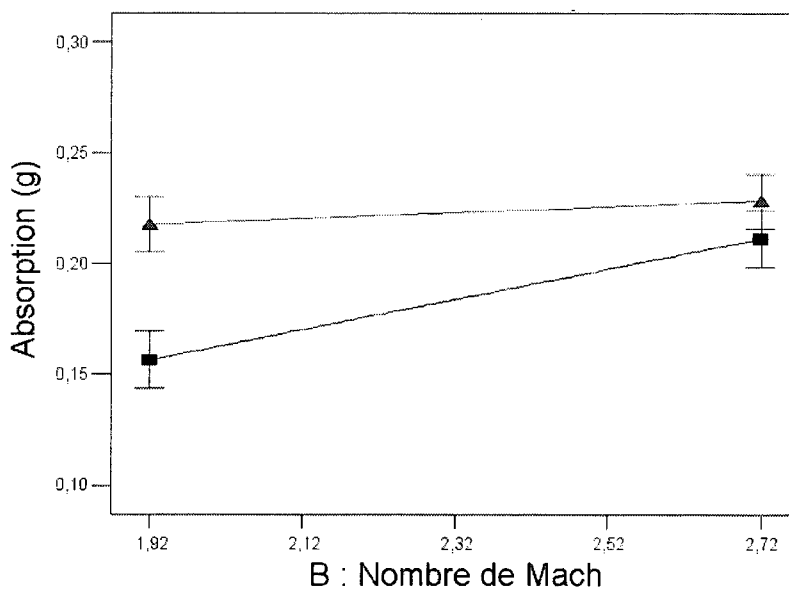


FIG. 4.24: Interaction BC lorsque la teinture est dégazée avant les tests. Les courbes sont définies de la même manière qu'à la figure 4.23.

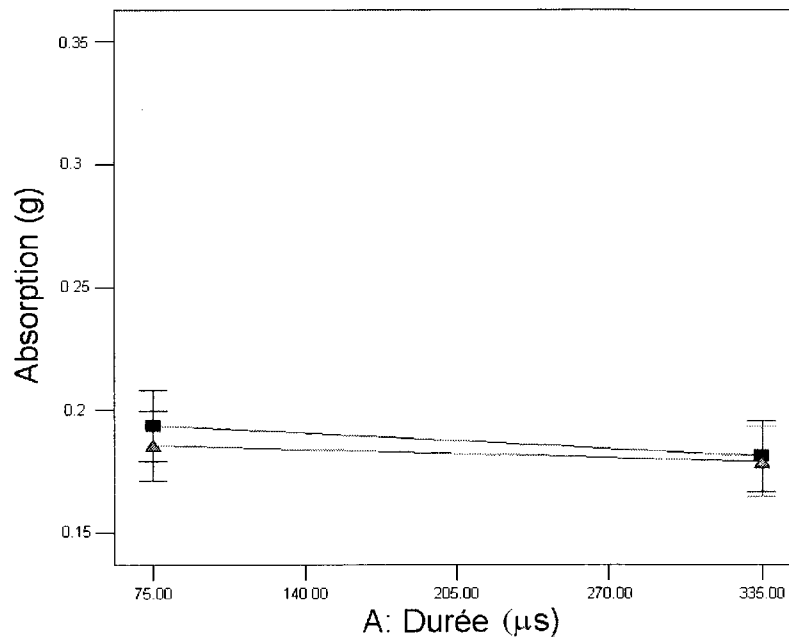


FIG. 4.25: Variation de l'absorption de teinture pas dégazée en fonction de la durée pour deux nombres de tirs différents ($Mach = 1,92$). Les courbes sont définies en fonction du nombre de tirs comme à la figure 4.23.

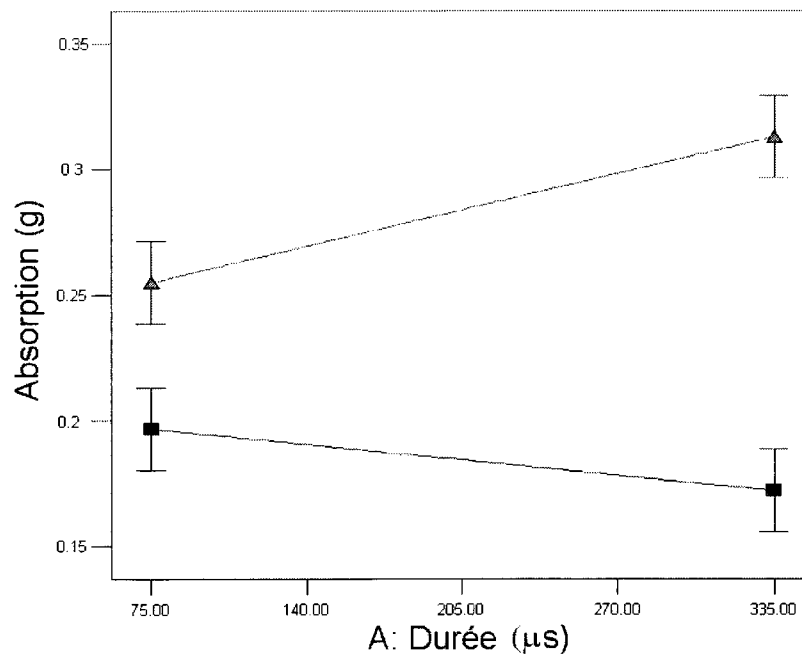


FIG. 4.26: Variation de l'absorption de teinture pas dégazée en fonction de la durée pour deux nombres de tirs différents ($Mach = 2,72$). Les courbes sont définies en fonction du nombre de tirs comme à la figure 4.23.

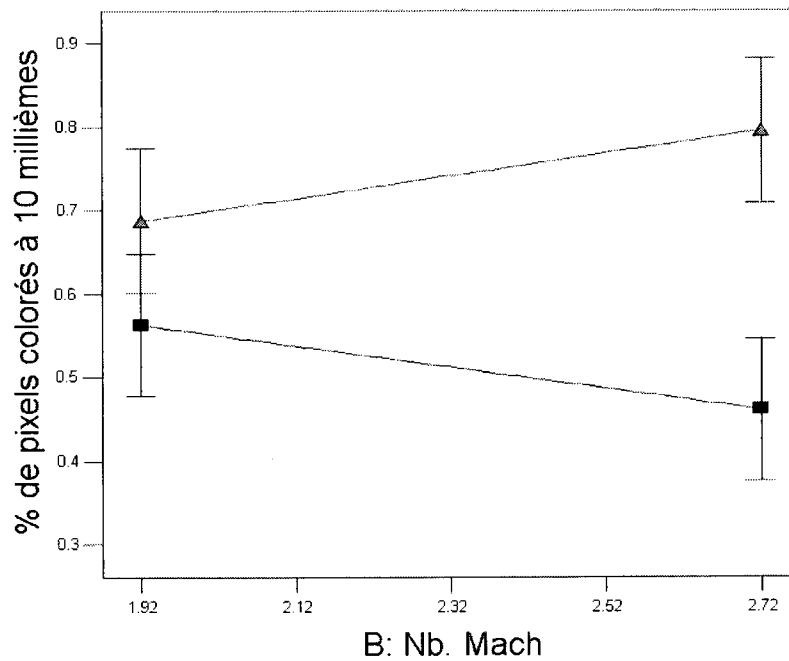


FIG. 4.27: Pourcentage de pixels colorés à dix millièmes de pouces de profondeur en fonction du nombre de Mach du choc incident. Les courbes sont définies en fonction du nombre de tirs comme à la figure 4.23.

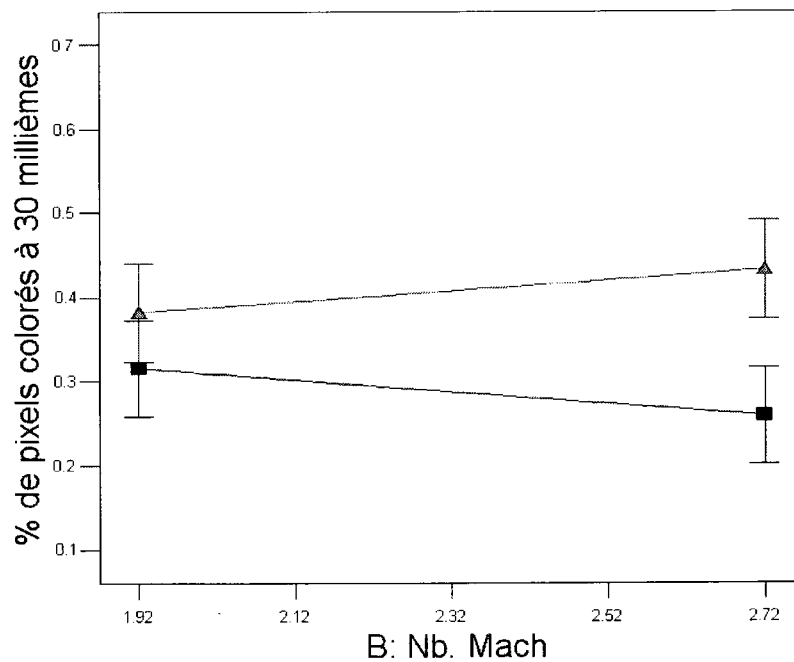


FIG. 4.28: Pourcentage de pixels colorés à 30 millièmes de pouces de profondeur en fonction du nombre de Mach du choc incident. Les courbes sont définies en fonction du nombre de tirs comme à la figure 4.23.

En ce qui concerne l'interaction BC, il n'est pas possible de conclure sur son effet à 30 millièmes. Cependant, le comportement observé à 30 millièmes sur la figure 4.28 est le même qu'à 10 millièmes, à la différence que le gain obtenu grâce à un choc plus fort avec 3 tirs est plus faible. L'effet des chocs semble s'amortir rapidement dans la microstructure du bois. Ainsi, comme l'affirmait BURDELL et BARNETT [1969] et SCHNEIDER et coll. [2003], les changements rapides de pression ont peu d'impact en profondeur dans le bois. Toutefois, davantage d'échantillons devraient être testés afin d'augmenter le niveau de confiance sur ces observations.

Validation des tests de pénétration maison

La pénétration des deux dernières séries d'échantillons a été mesurée au laboratoire afin de vérifier l'efficacité de la nouvelle méthode de mesure. Les résultats numériques sont présentés à l'annexe D.

Le tableau 4.10 montre les facteurs ayant une influence significative sur la pénétration. Dans un premier temps, il est intéressant de remarquer que le facteur le plus important semble être encore le nombre de tirs. De plus, il est possible que le dégazage ait encore un effet négatif sur la pénétration.

| Paramètres | DDL | Moyenne des carrés | F | Prob. erreur |
|--------------|-----|--------------------|---------|--------------|
| Bloc | 1 | 8,30E-4 | | |
| Durée (A) | 1 | 1,88E-8 | 3,58E-4 | 98,55% |
| Nb. tirs (C) | 1 | 8,74E-4 | 16,65 | 0,65% |
| Dégazage (D) | 1 | 2,21E-4 | 4,21 | 8,59% |
| AC | 1 | 6,77E-4 | 12,90 | 1,15% |
| AD | 1 | 5,18E-4 | 9,88 | 2,00% |
| Résidus | 6 | 5,25E-5 | | |
| Total | 13 | | | |

TAB. 4.10: Résultats ANOVA pour les mesures de pénétration réalisée au laboratoire dans le plan d'expérience complet à 4 facteurs

La durée semble aussi avoir un effet sur la pénétration. Toutefois, son effet varie. Lorsque la durée est importante, le nombre de tirs semble ne plus affecter l'imprégnation. Toutefois, lorsque la teinture n'est pas dégazée (figure 4.29), il est possible d'obtenir une meilleure pénétration avec trois ondes de choc de durée plus faible qu'avec trois ondes de choc de

durée plus importante. Davantage de tests sont cependant nécessaires pour confirmer ces observations, car seulement deux séries d'échantillons ont été testées (une répétition) et la pénétration n'était pas très importante dans plusieurs des conditions étudiées.

Conclusion partielle

Cette série de tests a permis de confirmer qu'une augmentation du nombre de Mach du choc et du nombre de tirs a une influence positive sur l'absorption de teinture dans le bois. Toutefois, le nombre de Mach semble n'avoir aucun effet sur la pénétration. Une explication possible est que le choc vient briser la structure des fibres à la surface, ce qui permet à la teinture d'y pénétrer davantage. La quantité de teinture retenue par le bois est donc supérieure. Ces échantillons devraient apparaître plus foncés en surface. L'effet du nombre de Mach est cependant moins défini sur la pénétration. Davantage de tests seraient nécessaires pour mieux évaluer son impact.

Ensuite, le dégazage de la teinture a aussi été étudié dans cette section. Étonnamment, le fait d'enlever l'air contenu dans la teinture réduit l'absorption et la pénétration. Pour le moment, deux explications peuvent être avancées :

1. Le dégazage n'est pas effectué en continu. Il est possible que l'air emprisonné dans le bois en sorte plus rapidement lorsque la teinture est dégazée, formant une couche de bulles amortissant les chocs.
2. La teinture est dégazée sous vide, permettant l'évaporation d'une portion du solvant. Cette opération réduit la concentration de solvant dans la solution, ce qui modifie probablement le comportement rhéologique. Ainsi, les plus faibles niveaux d'absorption et de pénétration pourraient s'expliquer par une viscosité plus élevée de la teinture dans les conditions de tests.

Finalement, il a été possible de mesurer l'effet de la durée du choc sur le processus d'imprégnation. Malgré tout, son effet reste nébuleux. Une augmentation de la durée se traduit bel et bien par davantage d'absorption aux conditions les plus intéressantes. Toutefois, un choc plus court semble donner de meilleurs résultats pour la pénétration. Des essais plus poussés seront nécessaires pour mieux évaluer l'effet de ce paramètre.

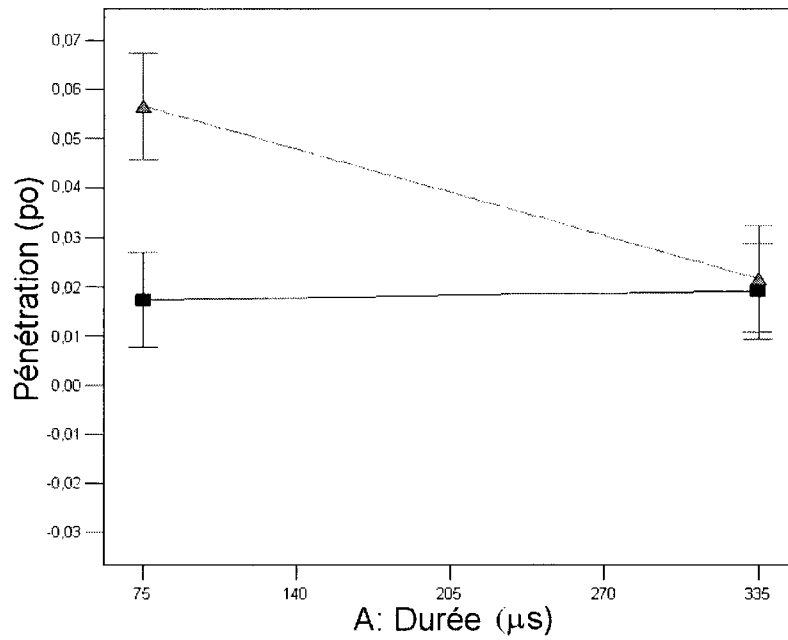


FIG. 4.29: Variation de la pénétration mesurée au laboratoire en fonction de la durée en utilisant de la teinture non dégazée. Les deux courbes sont définies selon le nombre de tirs comme à la figure 4.23 de la page 119.

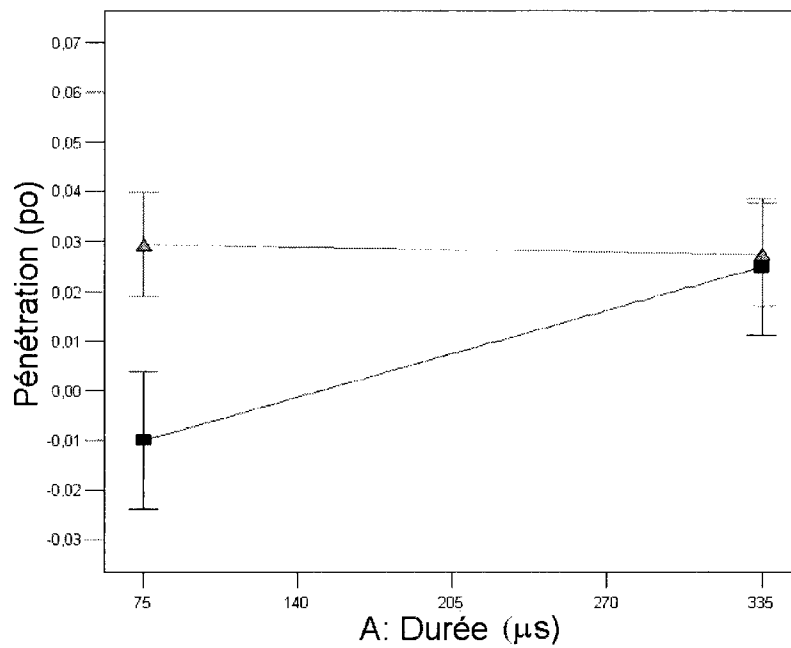


FIG. 4.30: Variation de la pénétration mesurée au laboratoire en fonction de la durée en utilisant de la teinture dégazée. Les deux courbes sont définies selon le nombre de tirs comme à la figure 4.23.

4.5.4 Tests sur du merisier modifié et sur deux autres espèces de bois franc

Objectifs

Les tests précédents ont permis d'établir les paramètres influençant l'absorption et la pénétration de teinture dans le bouleau jaune. Cependant, les niveaux de pénétration observés restent insuffisants pour permettre une commercialisation du procédé. Afin de tenter d'augmenter la pénétration dans cette essence, le prétraitement utilisant des micro-ondes décrit par TORGOVNIKOV et VINDEN [2002, 2004] sera appliqué sur les échantillons pour en accroître la perméabilité.

Ensuite, des tests seront réalisés avec de l'érable et du peuplier pour vérifier l'effet du traitement sur des espèces différentes. L'érable donne un bois plus dur et plus dense que le bouleau jaune. Pour sa part, le peuplier jaune est plus léger (et donc plus poreux) que les deux autres. Ces trois espèces sont des bois durs à pores diffus.

Finalement, ces tests seront aussi l'occasion de tester la procédure de préparation des échantillons décrite à la section 4.2.1. Ces tests permettront également de vérifier si le protocole de mesure de la pénétration au laboratoire fonctionne correctement lorsqu'une plus grande quantité de données est disponible et si la dureté du bois est affectée par la procédure d'imprégnation.

Paramètres étudiés

Cette série de tests permettra principalement d'étudier l'effet des ondes de choc sur différentes essences de bois. Ainsi, tous ces tests seront réalisés avec de l'érable à sucre (*Acer saccharum*), du peuplier jaune (probablement *Liriodendron tulipifera*) et du bouleau jaune (*Betula alleghaniensis*), communément appelé merisier. Un quatrième groupe comprendra des échantillons de bouleau jaune modifiés au micro-ondes à la manière décrite à la section 4.2.1.

Ensuite, les deux paramètres du choc ayant le plus d'influence, l'amplitude du choc et le nombre de tirs, pourront chacun prendre deux valeurs différentes. Le nombre de Mach pourra varier entre 1,89 et 2,51. Les nombres de Mach sont un peu plus faibles que pour l'expérience précédente. Pour sa part, le nombre de tirs varie toujours entre 1 et 3.

Dans cette série de tests, deux paramètres seront laissés de côté. Tout d'abord, la teinture ne sera pas dégazée. Ensuite, aucun contrôle ne sera fait pour la durée. Pour le dégazage, c'est une décision facile à expliquer : la procédure actuelle nuisait à l'imprégnation du bois dans la série de tests précédente. Pour la durée, c'est surtout une question de logistique. Modifier la longueur de la chambre demande beaucoup de temps. De plus, l'objectif de cette étude est de vérifier l'effet du prétraitement, non de refaire tous les tests. Comme la durée a un effet plus limité que l'amplitude du choc ou le nombre de tirs, il était donc logique de laisser ce facteur de côté le temps d'une série d'essais. La longueur de la chambre haute pression restera donc à son maximum tout au long des tests, et l'effet de l'amplitude du choc sera confondu en partie avec les variations de durée.

Hypothèses

1. La combinaison de la trempe et des micro-ondes devrait augmenter la perméabilité du bois prétraité. Donc, il est attendu que l'absorption et la pénétration soient plus importantes dans ces échantillons.
2. Les résultats obtenus par STAMM [1973] indiquent que l'aubier du peuplier jaune est plus perméable que le bouleau jaune. L'érable serait toutefois moins perméable.
3. Si le choc augmente l'imprégnation en créant des dommages à la micro-structure, peut-être qu'un choc de plus grande amplitude sera nécessaire pour imprégner efficacement les essences de bois moins perméables.
4. L'effet du nombre de tirs devrait rester le même, et ce, peu importe l'essence de bois traité.

Méthodologie

Cette expérience sera séparée en 3 blocs. Une première série de tests a été réalisée les 9 et 11 juillet 2008. La deuxième série de tests a eu lieu le 12 et le 14 août 2008. Finalement, une troisième série de tests a été réalisée le 19 septembre 2008 avec seulement du bouleau et du bouleau modifié.

Le tableau 4.11 montre les taux d'humidité mesurés au laboratoire sur plusieurs journées pendant la période de réalisation des tests. Il est possible d'y remarquer que les valeurs obtenues pendant les mois de juin à août sont beaucoup plus élevées que celles mesurées

| Date | Hum. rel. (± 2 %) |
|--------------|------------------------|
| 17 juin | 58% |
| 7 juillet | 59% |
| 8 juillet | 65% |
| 9 juillet | 75% |
| 11 juillet | 53% |
| 27 juillet | 65% |
| 12 août | 63% |
| 14 août | 66% |
| 18 août | 64% |
| 12 septembre | 38% |
| 19 septembre | 24% |
| 22 septembre | 30% |

TAB. 4.11: Mesure du taux d'humidité relative au laboratoire durant la période de réalisation des tests. Ces valeurs sont basées sur une seule mesure. Le moment de la journée où cette lecture a été prise varie.

| Mois | Tmoy (°C) | | Pluie(mm) | Hum. rel. (%) | |
|-----------|-----------|------------|-----------|---------------|------------|
| | Moyenne | Écart-type | Somme | Moyenne | Écart-type |
| juin | 17,3 | 4,8 | 197 | 81,9 | 15,4 |
| juillet | 19,1 | 4,5 | 206* | 80,3 | 15,7 |
| août | 16,9 | 4,5 | 154* | 81,7 | 14,9 |
| septembre | 13,9 | 6,1 | 62,5 | 80,3 | 15,3 |

TAB. 4.12: Moyenne mensuelle des conditions climatiques mesurées à Sherbrooke en 2008. Les valeurs marquées d'une étoile sont basées sur des données incomplètes [Environnement-Canada, 2008].

au mois de septembre. Une aussi grande différence dans les taux d'humidité pourrait venir modifier la perméabilité du bois.

La différence entre les taux mesurés au cours de ces mois peut s'expliquer de deux manières. Tout d'abord, l'été 2008 a été particulièrement pluvieux. À l'opposé, le mois de septembre a été assez ensoleillé. Les données climatiques fournies aux tableaux 4.12 et 4.13 démontrent bien ce fait. Toutefois, il est aussi possible d'y remarquer qu'il n'y a pas une grande différence en terme d'humidité relative moyenne entre ces mois.

L'autre explication possible provient du système de climatisation. Effectivement, de l'air froid peut contenir moins d'eau que de l'air chaud. Si on refroidit l'air sans enlever d'eau, la teneur en humidité reste la même, mais elle représentera un pourcentage plus élevé de la capacité de l'air à retenir cette eau. Le pourcentage d'humidité relative sera donc plus

| Mois | Tmoy (°C) | Pluie (mm) | Hum. rel. 0600LST (%) | Hum. rel. 1500LST (%) |
|-----------|--------------|---------------|--------------------------|--------------------------|
| juin | 15,5 | 110,8 | 85,4 | 57,6 |
| juillet | 18,1 | 117,8 | 88,8 | 58,8 |
| août | 16,9 | 130 | 92 | 61,6 |
| septembre | 12,0 | 104,7 | 92,3 | 62,8 |

TAB. 4.13: Normales climatiques pour la station d'observation de Sherbrooke [EnvironnementCanada, 2008].

grand. L'effet sera inverse lorsque l'air est chauffé. En conclusion, la climatisation pourrait avoir fait augmenter significativement le taux d'humidité à l'intérieur du laboratoire pendant les chauds mois d'été, ce qui pourrait avoir affecté les mesures.

En ce qui concerne les échantillons maintenant, ils ont tous été préparés au laboratoire à l'aide de la procédure décrite à la section 4.2.1. La seule différence concerne le recouvrement des deux premières répétitions. Dans ces séries, certains échantillons ont été préparés avec un recouvrement de silicone et d'autre avec de l'époxy. De plus, l'époxy utilisé pour ces échantillons avait commencé à durcir. Le mélange d'époxy était encore frais au moment de recouvrir la dernière série de mesure.

Finalement, ces essais seront l'occasion de tester deux nouvelles méthodes de mesure. Ainsi, en plus de mesurer l'absorption par différence de densité, le test de pénétration maison sera utilisé sur une plus grande échelle. De plus, la dureté des échantillons sera testée avec le protocole présenté à la section 4.3.3.

Résultat pour les quatre essences

Les deux premières séries d'essais ont été analysées à l'aide du logiciel Design Expert pour évaluer la différence entre les essences. Toutefois, comme l'imprégnation diffère beaucoup entre les essences, deux modifications doivent être apportées :

1. Une transformation logarithmique doit être appliquée aux résultats pour stabiliser la variance, et ce, autant pour l'absorption que pour la pénétration.
2. La quantité d'informations disponibles est insuffisante pour différencier le bouleau et le bouleau modifié avec un niveau de confiance suffisant. Une troisième série répétition sera nécessaire pour ces deux types de bois.

| Paramètres | DDL | Moyenne des carrés | F | Prob. erreur |
|--------------|-----|--------------------|-------|--------------|
| Bloc | 1 | 0,11 | | |
| Essence(A) | 3 | 6,95 | 80,74 | <0,01% |
| Mach (B) | 1 | 0,41 | 4,82 | 4,42% |
| Nb. tirs (C) | 1 | 0,28 | 3,25 | 9,17% |
| AB | 3 | 0,075 | 0,87 | 47,64% |
| AC | 3 | 0,033 | 0,39 | 76,25% |
| BC | 1 | 0,077 | 0,89 | 36,02% |
| ABC | 3 | 0,22 | 2,60 | 9,06% |
| Résidus | 15 | 0,86 | | |
| Total | 31 | | | |

TAB. 4.14: Résultats ANOVA avec une transformation logarithmique pour les mesures d'absorption réalisés sur quatre essences de bois différentes.

De plus, comme la densité initiale des échantillons a été mesurée, il est possible de vérifier les observations de la section 4.5.2. Toutefois, en observant les données numériques fournies à l'annexe D, il est possible de constater que la densité varie peu entre les échantillons d'une même espèce.

Maintenant, le tableau 4.14 montre les résultats de l'analyse de la variance pour l'absorption. On y remarque que l'effet des blocs n'est pas significatif. Il est donc possible de conclure que la perméabilité du bois dans ces quatre blocs est similaire, ce qui expliquerait pourquoi la densité varie si peu.

Ensuite, le type de bois utilisé est le facteur affectant le plus l'absorption. La figure 4.31 montre d'ailleurs que le bouleau jaune modifié semble légèrement supérieur à sa version originale. Toutefois, une analyse plus poussée de ces données serait préférable. Pour leur part, le peuplier et l'érable semblent tous deux moins perméables que le bouleau jaune dans ce procédé d'imprégnation.

Pour ce qui est des paramètres du choc, l'amplitude a un effet significatif. Cependant, le nombre d'essais est insuffisant pour conclure sur l'effet du nombre de tirs. De plus, il est possible que l'essence utilisée ait une influence sur les chocs (interaction ABC), mais la quantité d'information est insuffisante pour en tirer une conclusion.

Pour poursuivre, le tableau 4.15 montre l'analyse de la variance pour la pénétration. Encore une fois, l'essence est le facteur le plus significatif. L'interaction ABC a également un effet

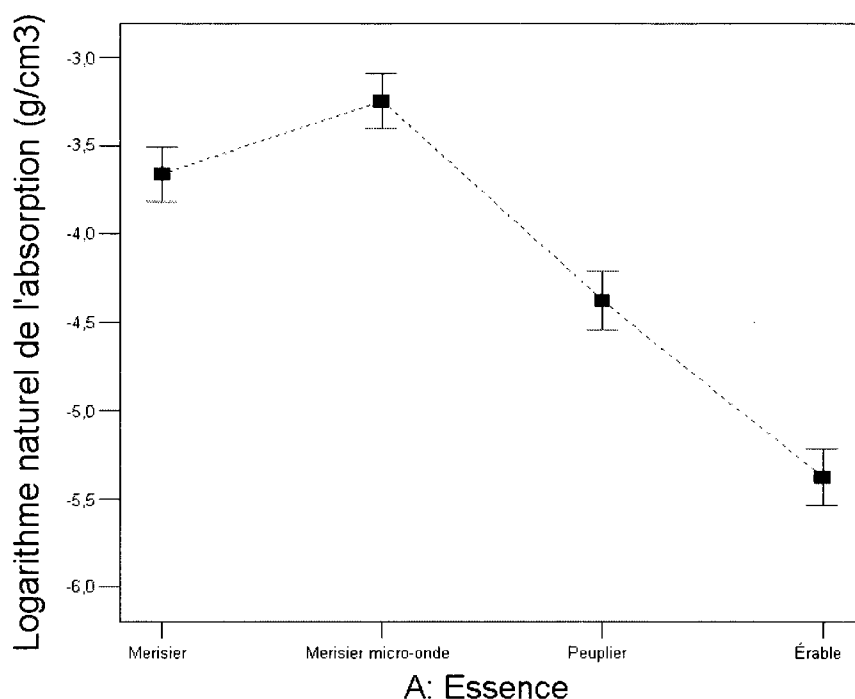


FIG. 4.31: Absorption de teinture pour trois essences de bois durs à pores diffus et pour du bouleau jaune modifié au micro-ondes

important, indiquant que les paramètres optimaux du traitement pourront être différents selon la perméabilité du bois traité. Cependant, comme quatre essences sont analysées en même temps et que la pénétration est très faible dans l'érable et dans le peuplier, ces résultats ne sont pas nécessairement représentatifs.

Finalement, comme environ la moitié des échantillons d'érable et de peuplier ont été recouverts avec de l'époxy, il est possible d'analyser l'effet du revêtement. Ainsi, les échantillons recouverts d'époxy semblent absorber un peu moins de teinture, mais la probabilité d'erreur reste importante ($p=7,06\%$). Cette observation permet tout de même de conclure que la colle époxy est meilleure ou équivalente au silicone pour prévenir la pénétration de teinture par les bouts.

Nouvelle série de tests pour le merisier et le traitement aux micro-ondes

Les deux premières répétitions de cette expérience ont montré que le bouleau jaune est plus facile à imprégner que l'érable à sucre ou le peuplier jaune. Toutefois, bien que le prétraitement aux micro-ondes semble améliorer l'imprégnation du bouleau jaune, la différence n'est

| Paramètres | DDL | Moyenne des carrés | F | Prob. erreur |
|--------------|-----|--------------------|-------|--------------|
| Bloc | 1 | 0,48 | | |
| Essence(A) | 3 | 3,19 | 18,64 | <0,01% |
| Mach (B) | 1 | 0,12 | 0,70 | 41,66% |
| Nb. tirs (C) | 1 | 2,39E-3 | 0,014 | 90,76% |
| AB | 3 | 0,17 | 1 | 42,05% |
| AC | 3 | 0,13 | 0,78 | 52,26% |
| BC | 1 | 0,076 | 0,44 | 51,49% |
| ABC | 3 | 0,85 | 4,99 | 1,35% |
| Résidus | 15 | 0,17 | | |
| Total | 31 | | | |

TAB. 4.15: Résultats ANOVA avec une transformation logarithmique pour les mesures de pénétration réalisés sur quatre essences de bois différentes.

pas suffisamment significative.

Afin d'augmenter le niveau de certitude, une nouvelle série de tests a été réalisée avec seulement le bouleau jaune et le bouleau jaune modifié. Ces tests ont donné des résultats étonnants. La figure 4.32 montre la surface numérisée de trois échantillons traités dans les conditions optimales de traitement et de trois échantillons traités à plus basse pression. Ils sont placés dans le même ordre que leur série d'échantillons. La pénétration est importante dans les deux premières séries, alors qu'elle est beaucoup plus faible dans la troisième.

Plusieurs facteurs pourraient expliquer ces différences :

1. La méthode de recouvrement est différente. Les deux premiers échantillons ont été recouverts de silicone, alors que le troisième a été recouvert d'époxy. De plus, l'époxy a été appliqué plus rapidement sur les échantillons de la troisième série que ce qui avait été testé précédemment. La colle était donc moins visqueuse et elle a probablement pénétré plus profondément dans le bois.
2. La coupe des échantillons était de meilleure qualité pour la dernière série de tests. Les côtés des premiers échantillons ont été brûlés lors de la coupe. De plus, la scie à ruban ne permettrait pas de réaliser des coupes droites. Les échantillons de la dernière série ont été coupés à l'aide d'une scie radiale, créant des échantillons plus droit et préservant les surfaces latérales.
3. Les deux premières séries ont été testées à un moment où le taux d'humidité ambiant

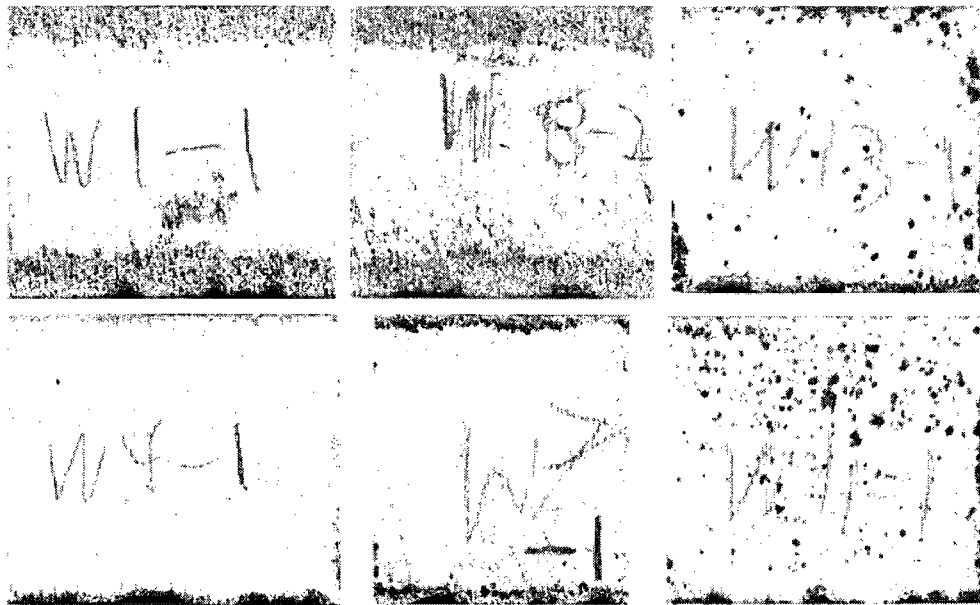


FIG. 4.32: Coupes numérisées de six échantillons de merisier prétraités au micro-ondes. Les échantillons de la rangée du haut ont été imprégnés dans le tube à choc avec trois ondes de choc de Mach 2,51, alors que ceux de la rangée du bas ont été traités avec trois ondes de choc de Mach 1,89. Pour leur part, les colonnes représentent la série d'échantillons. Les échantillons de la première colonne ont été traités au début du mois de juillet 2008, ceux de la deuxième colonne au début du mois d'août et ceux de la troisième colonne au milieu du mois de septembre de la même année.

était très élevé. Les derniers tests d'imprégnation ont été réalisés alors que le taux d'humidité était de 24% au laboratoire. Il est connu que la teneur en humidité du bois a une influence sur sa perméabilité. Or, cette différence pourrait être décuplée lorsque le bois est soumis à un traitement aux ondes de choc.

4. La dernière série provient d'une zone de perméabilité très différente dans la planche.

Différence entre les deux espèces

Les niveaux d'absorption et de pénétration sont très différents avec la nouvelle série d'essais. Cependant, les conditions favorisant l'absorption et la pénétration sont les mêmes. En effectuant l'analyse de la variance sur les résultats obtenus pour le bouleau jaune seulement (traités et non traités aux micro-ondes), l'ajout de la série supplémentaire permet de réduire grandement l'erreur statistique. Le niveau de confiance est donc augmenté.

Ainsi, après une transformation de type racine carrée pour égaliser la variance, il est possible de conclure que le prétraitement améliore l'absorption ($p = 1,10\%$). De plus, le nombre de tirs semble avoir un effet ($p = 5,91\%$), mais pas le nombre de Mach (valeur maximale à 2,51 au lieu de 2,86). Il semble donc y avoir un seuil à franchir pour que l'amplitude du choc ait un effet sur l'absorption.

En ce qui concerne la pénétration, les résultats de l'analyse de la variance pour les trois séries d'échantillons sont présentés dans le tableau 4.16. Les résultats étaient plus concluants en utilisant toutes les données disponibles, même si les niveaux de pénétration mesurés dans la dernière série sont très faibles.

L'analyse de la variance montre que les facteurs BC et ABC affectent significativement la pénétration de teinture. L'amplitude du choc a également un effet assez important en lui-même. Les figures 4.33 et 4.34 montrent l'évolution de l'interaction BC pour les deux valeurs de A. En les observant attentivement, il est possible de remarquer que l'amplitude de l'onde, le nombre de tirs et l'interaction entre ces deux facteurs n'ont pas d'influence sur le merisier avec les amplitudes d'ondes actuelles. Avec le merisier modifié toutefois, l'interaction BC est très importante. Ainsi, la pénétration est significativement plus élevée en traitant le bois avec trois tirs de grande amplitude lorsque le bois est soumis aux micro-ondes.

Ainsi, l'interaction BC a un effet significatif sur la pénétration comme pour la pénétration mesurée au CRIQ pour les tests à quatre facteurs. Toutefois, cet effet est présent seulement

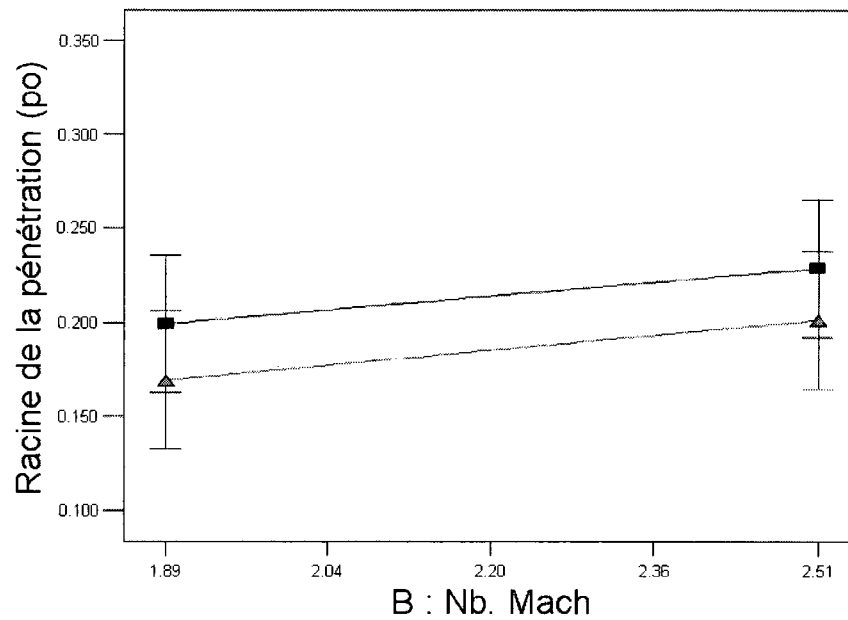


FIG. 4.33: Variation de la racine carrée de la pénétration mesurée au laboratoire dans le bouleau jaune original en fonction du nombre de Mach. La courbe avec des marqueurs carrés représente 1 tirs alors que la courbe utilisant les triangles est pour 3 tirs.

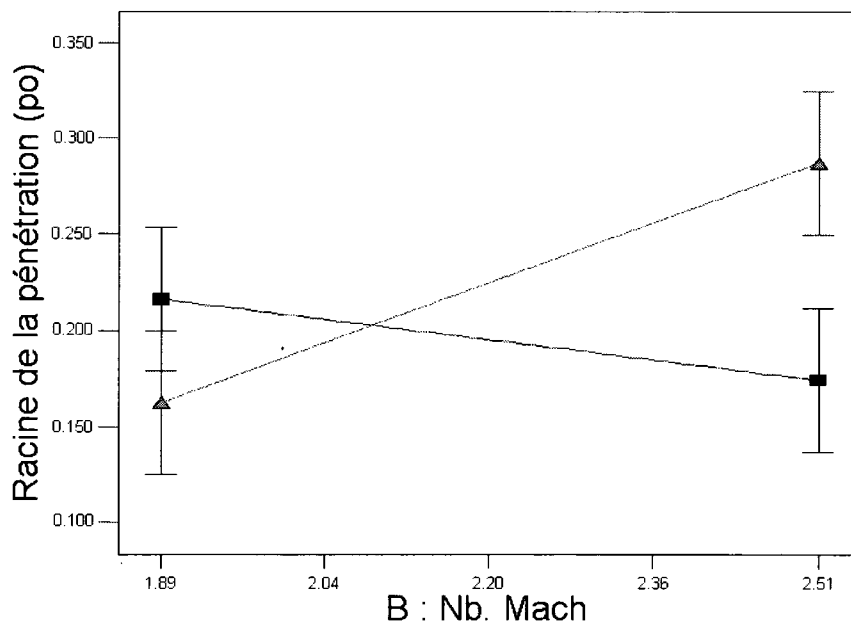


FIG. 4.34: Variation de la racine carrée de la pénétration mesurée au laboratoire dans le bouleau jaune pré-traité en fonction du nombre de Mach. Les courbes sont définies de la même manière qu'à la figure 4.33.

| Paramètres | DDL | Moyenne des carrés | F | Prob. erreur |
|--------------|-----|--------------------|---------|--------------|
| Bloc | 2 | 0,04 | | |
| Essence(A) | 1 | 6,76E-4 | 0,37 | 55,42% |
| Mach (B) | 1 | 8,02E-3 | 4,34 | 5,47% |
| Nb. tirs (C) | 1 | 1,29E-6 | 6,97E-4 | 97,9% |
| AB | 1 | 1,80E-4 | 0,098 | 75,90% |
| AC | 1 | 5,28E-3 | 2,86 | 11,17% |
| BC | 1 | 0,011 | 6,01 | 2,70% |
| ABC | 1 | 0,010 | 5,66 | 3,10% |
| Résidus | 15 | 1,85E-3 | | |
| Total | 24 | | | |

TAB. 4.16: Résultats ANOVA pour la racine des mesures de pénétration des échantillons de bouleau jaune traités au micro-ondes et d'origine.

pour le merisier modifié. Ça semble renforcer l'hypothèse qu'il existe un seuil de pression à franchir pour que l'amplitude ait un effet significatif sur l'imprégnation du bois. Ainsi, l'effet du nombre de Mach sur l'absorption pourrait être non linéaire. Ainsi, le prétraitement pourrait affaiblir la paroi des cellules, ce qui réduirait le seuil de pression requis pour obtenir des résultats intéressants.

Finalement, l'effet du traitement sur la dureté des échantillons de merisier a été mesuré à l'aide de la méthode décrite à la page 96. Pour ce faire, deux mesures ont été réalisées sur chaque échantillon, une de chaque côté de la coupe. Les résultats ont ensuite été compilés et une analyse de la variance a été réalisée sur les données. Cette analyse a montré que le prétraitement ($p=6,55\%$) et le nombre de Mach ($p=6,51\%$) pourraient réduire légèrement la dureté du bois. L'interaction BC pourrait également avoir un effet ($p=10,16\%$). Toutefois, le niveau de confiance est insuffisant pour tirer des conclusions.

Conclusion partielle

Le principal objectif de cette section était de vérifier l'effet du prétraitement utilisant des micro-ondes pour augmenter la pénétration du bois soumis à des ondes de choc. Cet objectif a été atteint. Il a maintenant été démontré que la combinaison de deux prétraitements (trempe et micro-ondes) augmente l'absorption de teinture et qu'elle peut contribuer à en augmenter la pénétration. Avec une procédure et des équipements plus élaborés, il serait

possible d'obtenir des résultats intéressants. Toutefois, les micro-ondes (et les ondes de choc) réduisent possiblement la dureté. Comme l'indiquent TORGOVNIKOV et VINDEN [2002], il est probable qu'un four à micro-ondes plus puissant réduirait davantage la dureté. D'autres mesures devraient être effectuées pour éclaircir ce fait.

Des tests ont également été faits sur deux autres essences de bois (érable à sucre et peuplier jaune) afin de vérifier si ces essences étaient plus faciles à imprégner. La conclusion est que le bouleau jaune permet d'obtenir des niveaux d'absorption largement supérieurs à ceux obtenus pour les deux autres essences de bois, indiquant du fait même que sa perméabilité est supérieure aux autres essences testées.

Troisièmement, le nombre de Mach n'a pas la même influence sur l'absorption dans cette série de tests que lors des tests précédents. Une explication possible est que le choc le plus fort (2,51) est plus faible que ce qui avait été testé précédemment (2,86). Il existe peut-être un seuil à franchir pour que l'amplitude du choc ait un effet important. La présence d'une interaction BC importante sur la pénétration du merisier modifié laisse à penser que ce traitement pourrait avoir déplacé le seuil de pression. Cependant, cette série de tests était beaucoup moins élaborée que la série précédente. Davantage de répétitions de chacune des conditions permettraient sans doute d'arriver à de meilleures conclusions.

Finalement, le niveau de pénétration obtenu dans les deux premières séries est très important. Toutefois, il n'a pas été possible d'obtenir les mêmes résultats lors de la troisième répétition. Il est possible que la teneur en humidité du bois ait influencé significativement la pénétration. Ces observations sont conformes à celles de MEIJER et coll. [2001], qui ont montré que la pénétration de trois types de peinture (une à base de solvant et deux à base d'eau) est supérieure dans un bois humide (testé jusqu'à 28% d'humidité relative). En plus d'une possible variation de la perméabilité, les auteurs affirment que les parois des cellules absorbent le liquide contenu dans la teinture, ce qui fait augmenter sa concentration en pigment et, donc, la viscosité de la teinture. L'absorption par les parois sera plus faible lorsqu'elle contient déjà une grande quantité d'eau. Ainsi, le comportement rhéologique sera modifié plus lentement lorsque le bois est humide.

Ce lien entre le taux d'humidité et la viscosité pourrait également expliquer pourquoi la différence de pénétration est aussi frappante lorsque le bois est soumis à des ondes de choc de grandes amplitudes. Tel que démontré lors de l'étude théorique au chapitre 3, l'amélioration de la pénétration avec des ondes de choc est uniquement due au caractère non newtonien du fluide utilisé. Si l'onde de choc n'est plus suffisante pour entraîner une baisse de la viscosité,

et bien elle n'a plus d'effet.

La variation de la teneur en humidité du bois explique bien la variation de pénétration observée, mais ce n'est pas la seule explication possible. L'effet du revêtement à l'époxy pourrait aussi avoir de l'importance. Ainsi, il serait important de vérifier l'effet de ces éléments lors des prochaines séries d'essais avec le tube à choc.

4.5.5 Tests à l'aide du cylindre pressurisé

Objectifs

Cette série de tests vise deux objectifs principaux :

1. Les tests effectués avec le canon ont montré que la durée avait un effet très limité sur l'imprégnation entre 75 et 335 μ s. Il reste à vérifier si des ondes ayant une durée de l'ordre de 1 μ s peuvent avoir un impact intéressant. Cette série de tests en fera une évaluation préliminaire.
2. Vérifier les niveaux d'absorption pouvant être obtenus à dans le même temps avec une pression statique de 120 lbf/po².

Méthodologie

Trois facteurs seront étudiés dans cette expérience. Le premier facteur est l'effet des ondes de choc. Ainsi, certains échantillons seront soumis à deux chocs par seconde pendant dix minutes. Ces chocs seront envoyés selon deux angles d'incidence différents (45° et 90°). Un autre tiers des échantillons ne seront pas exposés aux ondes et serviront de témoin.

Ensuite, comme la majorité des processus industriels d'imprégnation du bois utilisent une pression statique, il est intéressant de vérifier l'effet de ce paramètre sur l'imprégnation. De plus, MARCOK et KURJATKO [1996] ont trouvé que les ultrasons avaient davantage d'impact lorsqu'ils sont utilisés en combinaison avec une pression statique. La moitié des échantillons sera donc traitée à la pression atmosphérique, alors que les autres seront soumis à une pression statique de 120 lbf/po² pendant dix minutes. Ensuite, pour que le traitement ressemble davantage à un procédé de Lowry (voir la section 2.3.1), un vide sera appliqué pendant une à deux minutes après avoir retiré la pression statique.

Il aurait été possible de tester un autre type de traitement. Ainsi, un vide aurait pu être appliqué au lieu d'une pression statique. Ce vide aurait permis de retirer l'air en continu dans le procédé, permettant peut-être d'augmenter l'efficacité des ondes. Ce vide aurait aussi aidé à retirer l'air contenu dans le bois, ce qui pourrait faciliter la pénétration de teinture. Toutefois, cette condition n'a pas été testée pour limiter le nombre d'essais par bloc.

Finalement, le dernier facteur étudié est le prétraitement du bois aux micro-ondes pour en augmenter la perméabilité. Les résultats obtenus avec le canon sont prometteurs. Il serait intéressant de voir si l'effet est le même avec un générateur électronique et une pression statique.

Le plan d'expérience généré avec ces facteurs sera répété deux fois. Vingt-quatre échantillons répartis en deux blocs seront traités.

L'effet d'autres facteurs aurait pu être étudié sur ce système. Dans des tests subséquents, il sera possible de varier la fréquence des impacts, la forme du signal envoyé au générateur, l'amplitude du choc généré, la distance entre la tige émettrice et l'échantillon, le temps de trempe et l'effet du dégazage. Toutefois, avant de changer tous ces paramètres, il est important de s'assurer que les chocs ont bel et bien un effet sur l'imprégnation. Tous les tests ont tout de même été réalisés avec de la teinture dégazée, car la présence de bulle dans le liquide a un effet marqué sur l'efficacité de ce type de générateur.

Pour finir, la procédure suivie pendant les tests sera celle décrite à la section 4.2.4. Le temps de trempe sera d'environ 25 minutes, tout comme pour le tube à choc. Les échantillons seront aussi tous préparés à l'aide de la procédure décrite à la section 4.2.1, ce qui signifie que les surfaces transversales sont recouvertes de deux couches d'époxy.

Hypothèses

1. Les ondes, même si la durée est plus courte, devraient avoir un impact favorable sur l'imprégnation. Comme le décrit MYERS [1970], un angle de 45° pourrait aider à retirer la couche d'air qui risque de se former à la surface du bois
2. La pression statique aura un impact favorable sur l'imprégnation, même en seulement dix minutes.
3. Il est possible que la présence des ondes interagisse avec la pression statique, ce qui améliorerait encore davantage l'imprégnation.

4. Le prétraitement aux micro-ondes devrait encore ici affecter positivement l'imprégnation.

Réalisation des tests

Les tests ont été effectués en deux blocs les 11 et 12 septembre 2008. La première pesée des échantillons avait été réalisée le 27 juillet 2008, et la pesée finale le 22 septembre.

Le tableau 4.11 de la page 127 indique les pourcentages d'humidité relative mesurés au moment des pesées et des tests. On y remarque que la première pesée a été réalisée alors que le taux d'humidité était beaucoup plus élevé (65%) que pour les tests et la deuxième pesée (38 et 30%). Cette différence de taux entre les deux pesées pourrait avoir un impact sur la mesure de l'absorption. Effectivement, une variation du taux d'humidité du bois aura nécessairement un impact sur sa densité.

Finalement, la pénétration n'a pas été mesurée pour ces tests, car les niveaux observés étaient trop faibles pour pouvoir obtenir des résultats concluants avec la méthode actuelle.

Résultats des tests d'absorption

Les résultats numériques des tests sont présentés à l'annexe D. La première conclusion qu'il est possible d'en tirer est que l'absorption est très faible. D'ailleurs, tous les tests réalisés en septembre (cylindre pressurisé et tube à choc) ont une faible absorption. Une partie de cette différence peut toutefois s'expliquer par une variation importante du taux d'humidité entre la pesée initiale et la pesée finale. Pour le reste, cette faible absorption peut s'expliquer par l'effet de l'humidité sur la perméabilité et la viscosité ou par la préparation des échantillons. Ces explications sont les mêmes que celles décrites à la page 131 pour les tests avec le tube à choc.

Ensuite, le tableau 4.17 montre les résultats de l'analyse de la variance pour l'absorption de ces échantillons. Il est possible d'y remarquer que, comme présenté en page 129 pour le tube à choc, l'effet des blocs est limité lorsque les tests sont réalisés sur deux journées consécutives et que la préparation des échantillons est la même. Ainsi, la variabilité entre les séries d'échantillons a moins d'impact sur l'imprégnation que les conditions de préparation des échantillons.

| Paramètres | DDL | Moyenne des carrés | F | Prob. erreur |
|--------------------|-----|--------------------|--------|--------------|
| Bloc | 1 | 8,19E-4 | | |
| P. statique (B) | 1 | 0,024 | 151,57 | <0,01% |
| Pré-traitement (C) | 1 | 2,41E-3 | 15,14 | 0,10% |
| BC | 1 | 6,63E-4 | 4,17 | 5,54% |
| Résidus | 19 | 1,59E-4 | | |
| Total | 23 | | | |

TAB. 4.17: Résultats ANOVA à la suite d'une transformation des données de type racine carrée des résultats d'absorption des tests réalisés sur le cylindre pressurisé.

L'autre conclusion qu'il est possible de tirer de ces données, ce sont les facteurs significatifs. La pression statique et le prétraitement ont un effet significatif sur le traitement. C'est conforme aux hypothèses qui avaient été posées précédemment.

De plus, l'interaction entre ces deux facteurs est importante. Comme il est possible de le constater à la figure 4.35, le cycle de pression de Lowry réduit l'effet du prétraitement. Ainsi, le traitement dans des cuves pressurisées réduit l'impact d'une différence de perméabilité. Il serait malgré tout préférable de réaliser plus de tests pour confirmer cette observation, le niveau de confiance étant faible sur ce résultat (94,46%).

Pour ce qui est des ondes, cette expérience n'a pas été concluante. En fait, la présence ou non d'ondes ne semble pas avoir vraiment d'impact sur l'absorption. Elle modifie toutefois la distribution des résidus. Tel que l'on peut le constater à la figure 4.36, l'absorption paraît plus uniforme lorsque des ondes sont émises perpendiculairement à la surface à traiter.

Avant de conclure, il est bon de noter qu'une des hypothèses de l'analyse de la variance n'est pas respectée dans ce cas, même à la suite de la transformation de type racine carrée. Comme il est possible de le constater à la figure 4.37, les résidus ne sont pas normalement distribués dans cette expérience. Les résultats de l'analyse de la variance pourraient donc être inexacts.

Conclusion partielle

Les tests préliminaires réalisés sur le montage ont confirmé que le prétraitement du bois est une bonne idée. Ces tests mettent également en lumière l'effet positif d'une pression statique sur l'imprégnation. Toutefois, les ondes générées par le transducteur piézoélectrique ne

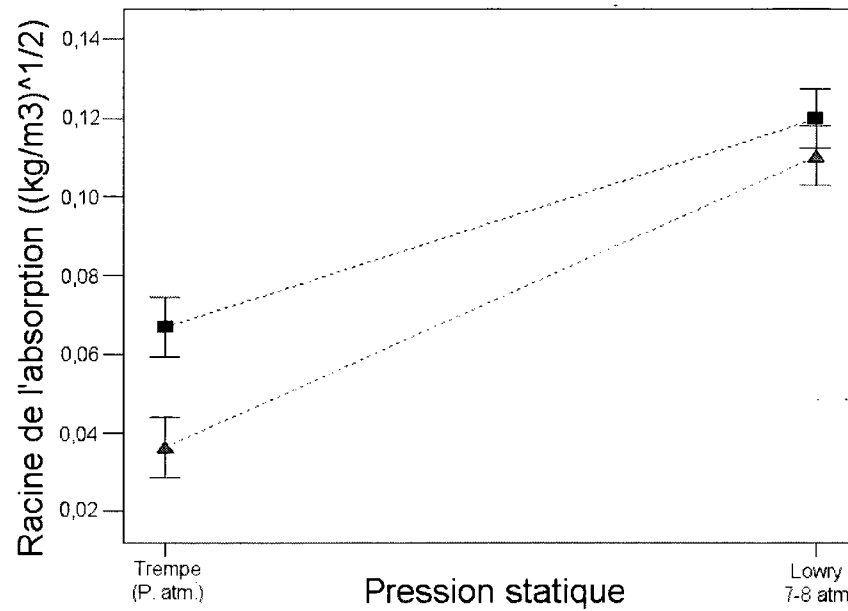


FIG. 4.35: Racine de l'absorption de teinture en fonction du cycle de pression sélectionné pour les tests dans le cylindre pressurisée. La courbe avec des marqueurs carrés représente le bois modifié aux micro-ondes alors que la courbe avec les marqueurs triangulaires représente le bouleau jaune d'origine.

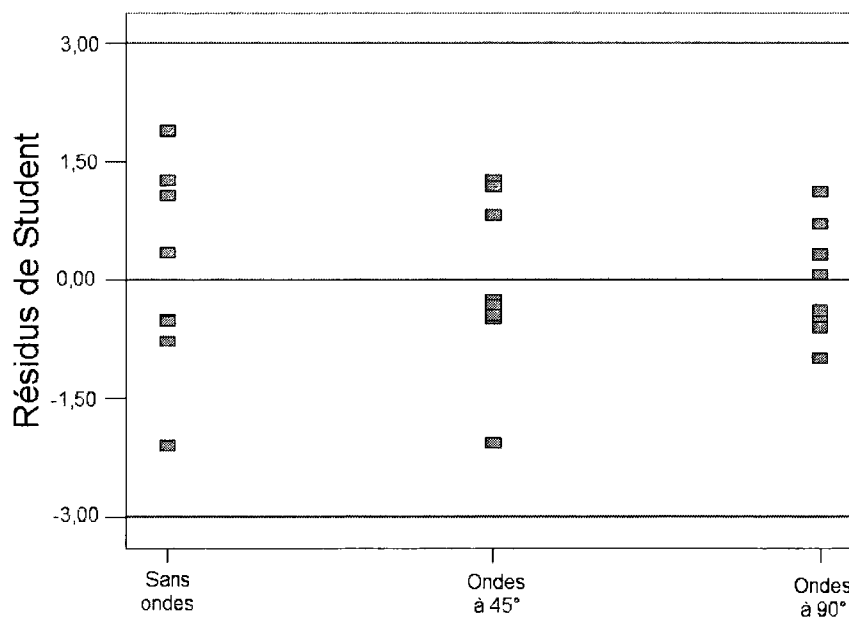


FIG. 4.36: Résidus de Student en fonction de l'angle d'incidence des ondes

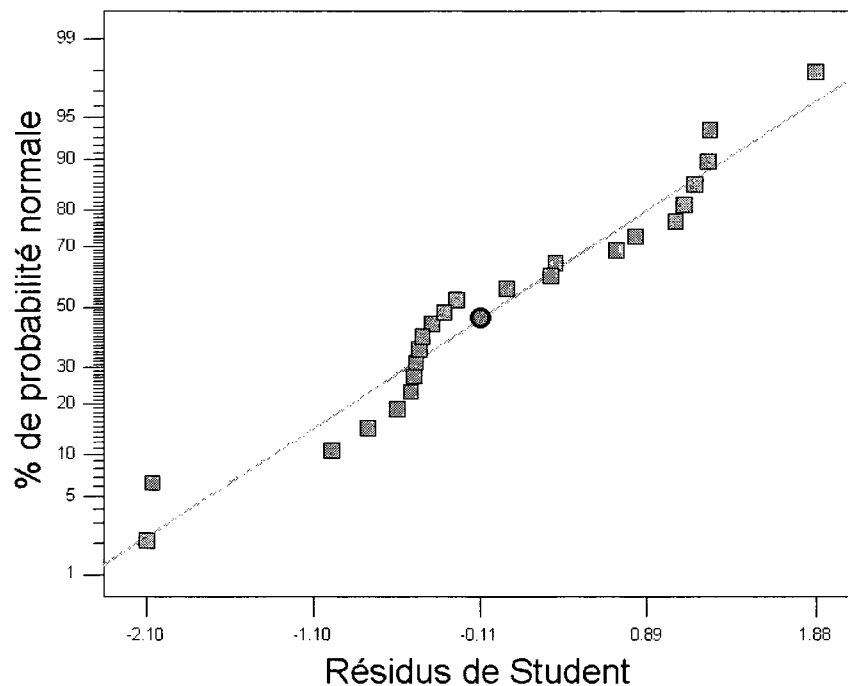


FIG. 4.37: Distribution des résidus selon leur pourcentage de probabilité normale pour la racine de l'absorption des tests avec le cylindre pressurisé

semblent pas avoir d'effet sur le processus. Il est possible que les faibles niveaux d'absorption mesurés n'aient pas aidé à lui rendre justice, mais l'effet des ondes demeure quand même beaucoup plus faible que ceux du prétraitement et de la pression externe. Des améliorations devraient donc être apportées au générateur d'onde avant de perfectionner cette technique.

4.5.6 Suite à donner aux essais d'imprégnation

Les tests réalisés dans le cadre de cette maîtrise ont permis d'éclaircir plusieurs points concernant l'effet des ondes de choc sur l'imprégnation du bois. Toutefois, plusieurs questions restent encore en suspens.

Tout d'abord, il a été démontré que l'utilisation d'un tube à chocs améliore l'absorption et la pénétration de teinture dans le bois. Le nombre de Mach du choc, le nombre de tirs et l'interaction entre ces deux facteurs sont les principales caractéristiques du choc influençant l'imprégnation. Une augmentation de chacun de ces paramètres a un effet positif sur l'imprégnation. Il semble toutefois y avoir un seuil de pression à dépasser pour que le nombre de Mach ait un effet sur l'absorption. Ce seuil de pression, si sa présence est confirmée, pourrait

être lié à la résistance d'un type de cellule présente à la surface du bois. Pour ce qui est de la pénétration, le nombre de Mach a moins d'effet. En fait, le choc semble s'amortir lorsqu'il pénètre dans le bois, un milieu très peu perméable.

La présente étude a également permis d'étudier quelques autres paramètres. Pour débiter, la durée a un effet sur l'imprégnation, mais il est moins bien défini que pour le nombre de Mach ou le nombre de tirs. En fait, son impact semble lié aux autres facteurs. Ensuite, la procédure actuelle pour dégazer la teinture a eu un impact négatif très net sur la pénétration. Cet effet peut s'expliquer par une évaporation partielle du solvant lors du dégazage, ce qui pourrait avoir modifié le comportement rhéologique de la teinture. Finalement, la combinaison de deux prétraitements (trempe et micro-ondes) sur le bouleau jaune a augmenté significativement les niveaux d'absorption mesurés. Le prétraitement interagit également avec les paramètres du choc pour accroître la pénétration.

D'un autre côté, même s'il reste des explications à fournir concernant l'effet des différents paramètres des chocs, le principal problème actuellement est la grande variation des niveaux de pénétration mesurés. Avec des ondes de choc de faible amplitude, la pénétration est toujours faible. Cependant, des ondes de fortes amplitudes ont permis d'obtenir une pénétration très intéressante pour certaines séries d'échantillons. Toutefois, la pénétration était faible pour d'autres échantillons traités dans les mêmes conditions.

La nature du revêtement des échantillons pourrait fournir une partie de la réponse, mais il est peu probable que ce soit le seul facteur expliquant les écarts observés. Ces variations peuvent être mieux expliquées par une variation du taux d'humidité du bois. Selon MEIJER et coll. [2001], un bois sec absorbe davantage le solvant de la teinture, ce qui en augmente la concentration en pigment et la viscosité. La pénétration est donc plus faible pour un bois sec que pour un bois humide. Afin de confirmer cette hypothèse, de nouveaux échantillons devraient être imprégnés dans le tube à choc en contrôlant leur taux d'humidité. Dans un premier temps, il serait possible de placer la moitié des échantillons dans un milieu parfaitement sec (dessiccant) et l'autre moitié dans un milieu avec un taux d'humidité de 100% jusqu'à ce que leur taux d'humidité se soit stabilisé. À long terme, l'utilisation d'une chambre environnementale devrait être envisagée pour tenter de trouver un taux d'humidité optimal pour l'imprégnation.

Finalement, le générateur électronique n'est pas efficace dans sa forme actuelle. Il serait préférable de mieux étudier le tube à choc et de bien caractériser les ondes produites par le générateur électronique avant d'étudier ce montage plus en détail.

Chapitre 5

CONCLUSION

5.1 Résumé des travaux

Cette recherche visait à développer un procédé d'imprégnation efficace et économique augmentant la pénétration de la teinture dans plusieurs essences de bois franc nord-américain. Cet objectif ambitieux n'a pas été complètement atteint, mais les phénomènes en jeu sont maintenant mieux connus.

La première étape de cette recherche a été la réalisation d'une importante étude bibliographique sur le bois et son traitement. Cette étude a notamment permis de comprendre à quel point le bois est un matériau complexe. Elle a aussi mis en relief la difficulté d'imprégner le bois dans la direction tangentielle, le liquide devant passer par de minuscules ouvertures appelées ponctuations afin de progresser dans la microstructure. Les modèles actuels de pénétration de la teinture dans le bois ont aussi été répertoriés. Ils ont permis d'identifier déjà certains facteurs influençant l'imprégnation, principalement la perméabilité du bois et la viscosité de la teinture.

Ensuite, les différentes techniques d'imprégnation utilisant des ondes de pression qui ont été étudiées par le passé ont été examinées. Des chercheurs ont tenté d'imprégner le bois à l'aide d'ondes soniques de basse fréquence, d'ultrasons, d'ondes de choc générés à l'aide de tubes à chocs et d'onde de choc d'ondes de choc produites à la suite de l'explosion sous-marine d'un cordeau d'explosif. Les différentes méthodes présentées augmentent l'absorption de biocide. D'ailleurs, la plupart des auteurs croient que l'efficacité de ces méthodes de

traitement provient de dégâts occasionnés à la microstructure du bois, ce qui pourrait en augmenter la perméabilité. Cependant, cette hypothèse n'a pas encore été validée à ce jour.

En second lieu, les connaissances acquises grâce à la recherche bibliographique ont servi à établir un modèle analytique de pénétration de la teinture dans un milieu poreux idéal. Ce modèle se veut une adaptation de celui de Darcy pour un écoulement instationnaire. Il ne représente pas exactement la réalité et ne peut pas être utilisé pour prédire quantitativement la pénétration. Cependant, il s'est avéré très utile pour étudier qualitativement l'effet des différentes variables du système, ce qui s'est traduit par des découvertes étonnantes.

Tout d'abord, le choc se traduit dans ce modèle par une discontinuité en vitesse. Ainsi, à la suite du passage du choc, la vitesse est très élevée. Cette vitesse crée une force de frottement visqueuse beaucoup plus grande que le différentiel de pression. Ainsi, le paramètre dominant dans cette équation est le ratio $\phi \cdot \mu/k$, avec ϕ la porosité, μ la viscosité et k la perméabilité du milieu poreux. Ainsi, c'est les caractéristiques de la teinture et du bois qui déterminent l'efficacité d'un procédé d'imprégnation utilisant des ondes de choc. Or, il y a plus. Comme décrits ci-haut, plusieurs auteurs pensent que les ondes de pression pourraient augmenter la perméabilité du bois. De plus, MEIJER et coll. [2001] ont montré que les enduits pigmentés présentent un comportement rhéofluidifiant, c'est-à-dire que la viscosité diminue avec le taux de déformation. Cette dernière information est particulièrement importante. Effectivement, le comportement rhéologique de la teinture Minwax utilisée pour les tests a été mesuré, et ces tests ont confirmé le comportement rhéofluidifiant de la teinture. En passant du premier au second plateau newtonien, la viscosité apparente est divisée par 56. Si les ondes de choc créent des taux de déformation suffisant pour amener la teinture à son second plateau newtonien, une augmentation importante de la pénétration est attendue.

L'importance du comportement rhéofluidifiant de la teinture a été démontrée lors de la résolution numérique du système d'équations différentielles. Cette analyse a montré que la perméabilité et le diamètre caractéristique sont les paramètres influençant le plus la pénétration. Or, le diamètre caractéristique est lié directement au calcul du taux de déformation. Des essais additionnels ont d'ailleurs montré que les ondes de choc améliorent la pénétration des fluides rhéofluidifiants, mais pas celles de fluides newtoniens comme le benzène. En plus, la pénétration est moins influencée par une différence de perméabilité grâce aux chocs. Ainsi, les ondes de choc permettraient de teindre des espèces moins perméables et assureraient une pénétration plus uniforme de la teinture.

Les résultats obtenus grâce à la simulation ont également permis de préparer les essais

expérimentaux. Effectivement, le modèle a montré que la durée et l'amplitude du choc ainsi que le nombre de tirs sont des paramètres augmentant la pénétration de la teinture. Ils ont mis en évidence également l'importance de bien maîtriser la variabilité du bois, la perméabilité influençant grandement la pénétration.

Pour terminer le processus d'étude, plusieurs séries d'essais ont été réalisées suivant la technique des plans factoriels. L'utilisation de cette technique a permis de prouver l'effet bénéfique des ondes de choc sur l'absorption et la pénétration de la teinture. Ces tests ont démontré qu'un accroissement du nombre de tirs et de l'amplitude se traduit par une augmentation de l'absorption. En ce qui concerne l'amplitude du choc, les derniers résultats obtenus laissent croire qu'il existe un seuil à franchir afin d'imprégner efficacement le bois. Un prétraitement aux micro-ondes servant à augmenter la perméabilité semble abaisser ce seuil, mais davantage d'essais seront nécessaires pour confirmer le tout.

Ces essais ont également montré que l'absorption et la pénétration de teinture variaient beaucoup avec l'échantillon et la date de réalisation des tests (et donc selon le taux d'humidité du bois). Or, selon MEIJER et coll. [2001], un bois sec absorbe davantage le solvant de la teinture, ce qui en augmente la concentration en pigment et la viscosité. La pénétration est donc plus faible pour un bois sec que pour un bois humide.

La viscosité peut également expliquer un autre résultat surprenant. Ainsi, il a été démontré que le fait de dégazer la teinture réduit l'absorption et la pénétration du solvant, alors que l'effet du choc sur le bois devrait être amplifié. Or, si l'on considère que la technique utilisée pour le dégazage modifie le comportement rhéologique de la teinture en augmentant la concentration en pigment, ce résultat devient tout à fait plausible.

5.2 Apport original de la recherche

La présente recherche a permis d'apporter un nouvel éclairage à l'imprégnation du bois assistée par ondes de choc. Tout d'abord, l'effet bénéfique des ondes de choc sur l'imprégnation d'une teinture dans le bois a été démontré lors de plusieurs séries d'essais expérimentaux et avec un niveau de confiance suffisant. Il a aussi été démontré qu'un traitement aux ondes de choc peut-être avantageusement combiné avec un prétraitement aux micro-ondes servant à augmenter la perméabilité du bois.

Cependant, les essais tendent à montrer que les conditions environnementales, particulièrement le taux d'humidité ambiant, influencent l'imprégnation. Il semble aussi exister une amplitude minimale des chocs devant être utilisée pour imprégner le bois efficacement. Ce seuil à franchir est fort probablement différent d'une espèce à l'autre comme le montre les résultats de la section 4.5.4. De plus, il n'a pas été établi avec certitude si les ondes de choc et le prétraitement aux micro-ondes réduisent la dureté du bois significativement.

Finalement, la plupart des autres chercheurs estimaient que les ondes amélioraient l'imprégnation en augmentant la perméabilité du bois. Or, en combinant les résultats obtenus grâce au modèle théorique, le fait que le dégazage nuit à l'imprégnation et l'effet probable du taux d'humidité sur la pénétration, il est possible de conclure que le choc réduit la viscosité de la teinture. Cette interaction entre le choc et le comportement rhéologique de la teinture expliquerait en grande partie leur effet bénéfique sur l'imprégnation. C'est une nouvelle manière de voir les choses qui permet de mieux comprendre et maîtriser l'imprégnation du bois à l'aide d'ondes de choc.

5.3 Projection future

Grâce aux résultats obtenus lors de cette recherche, il est maintenant possible d'imaginer une usine appliquant de la teinture sur le bois en continu et à une plus grande profondeur. Avec les connaissances actuelles, un procédé industriel d'imprégnation en six étapes simples peut être imaginé :

1. Tout d'abord, le bois vert est coupé en planche de la largeur et de l'épaisseur voulue.
2. Ces planches sont amenées dans une unité de prétraitement aux micro-ondes pour en augmenter la perméabilité si nécessaire et si la dureté du bois n'en est pas trop affectée.
3. Les planches sont séchées une première fois pour les amener au taux idéal d'humidité pour l'imprégnation.
4. Le procédé d'imprégnation aux ondes de choc est appliqué sur le bois en continu sur la chaîne de production. La façon de traiter des planches de grande dimension à l'aide de cette technique reste toutefois à déterminer
5. Le bois est séché une deuxième fois pour l'amener au taux d'humidité requis pour l'utilisation finale.

Ce procédé d'imprégnation augmentera la durabilité des planchers de bois franc préfinis en accroissant la pénétration du produit. Bien entendu, il reste beaucoup de travail à faire avant d'en arriver là. Avant de commercialiser le procédé, il faut être en mesure de passer du qualitatif au quantitatif, c'est-à-dire en arriver à prédire la pénétration de la teinture en fonction des conditions de test. Afin de se rapprocher de cet objectif, une prochaine recherche sur le sujet pourrait investiguer un ou plusieurs des aspects suivants :

1. Tester rigoureusement l'effet du taux d'humidité sur un traitement aux ondes de choc et trouver le taux d'humidité et le nombre de Mach idéal pour imprégner quelques essences de bois commercialement intéressantes.
2. Effectuer davantage d'essais avec une nouvelle version du générateur électronique développé au LOCUS.
3. Poursuivre les observations au MEB pour arriver à observer de possibles dommages causés à la microstructure du bois par les ondes de choc.
4. Mesurer la perméabilité du bois pour vérifier l'effet des ondes de choc et du prétraitement sur cette variable.
5. Étudier l'effet d'une pression statique différente de la pression atmosphérique sur l'efficacité d'un traitement aux ondes de choc.
6. Analyser plus en profondeur l'effet des ondes de choc sur la viscosité de la teinture et étudier l'impact de cette découverte sur le procédé d'imprégnation.
7. Valider le modèle analytique et essayer d'établir des corrélations entre les résultats de la simulation et les essais expérimentaux.

Annexe A

RÉSULTATS NUMÉRIQUES DE L'ANALYSE THÉORIQUE

| Std | Run | A Durée μs | B Mach | C nb. tirs | D Perméabilité μm^2 | E Dia. pores μm | Pénétration mm |
|-----|-----|-----------------------|-----------|---------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------|
| 53 | 1 | 205 | 2,72 | 2 | 1E-3 | 30 | 0,028745 |
| 25 | 2 | 205 | 2,32 | 2 | 7E-4 | 0,1 | 0,08501 |
| 13 | 3 | 205 | 1,92 | 1 | 7E-4 | 0,1 | 0,084534 |
| 23 | 4 | 205 | 1,92 | 2 | 1E-3 | 0,1 | 0,11252 |
| 39 | 5 | 335 | 2,32 | 2 | 4E-4 | 30 | 0,017987 |
| 51 | 6 | 205 | 2,72 | 2 | 4E-4 | 30 | 0,01814 |
| 48 | 7 | 75 | 2,32 | 3 | 7E-4 | 30 | 0,019191 |
| 17 | 8 | 75 | 2,32 | 1 | 7E-4 | 0,1 | 0,084512 |
| 41 | 9 | 335 | 2,32 | 2 | 1E-3 | 30 | 0,028525 |
| 42 | 10 | 205 | 1,92 | 1 | 7E-4 | 30 | 0,017314 |
| 49 | 11 | 335 | 2,32 | 3 | 7E-4 | 30 | 0,02698 |
| 40 | 12 | 75 | 2,32 | 2 | 1E-3 | 30 | 0,021669 |
| 46 | 13 | 75 | 2,32 | 1 | 7E-4 | 30 | 0,016964 |
| 26 | 14 | 205 | 2,32 | 2 | 7E-4 | 0,1 | 0,08501 |
| 30 | 15 | 75 | 1,92 | 2 | 7E-4 | 30 | 0,017008 |
| 57 | 16 | 205 | 2,32 | 2 | 7E-4 | 30 | 0,021176 |
| 20 | 17 | 335 | 2,32 | 3 | 7E-4 | 0,1 | 0,086209 |

Suite à la prochaine page

| Std | Run | A Durée μs | B Mach | C nb. tirs | D Perméabilité μm^2 | E Dia. pores μm | Pénétration mm |
|-----|-----|-----------------------|-----------|---------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------|
| 21 | 18 | 205 | 1,92 | 2 | 4E-4 | 0,1 | 0,054253 |
| 55 | 19 | 205 | 2,32 | 2 | 7E-4 | 30 | 0,021176 |
| 8 | 20 | 205 | 2,32 | 3 | 1E-3 | 0,1 | 0,11338 |
| 29 | 21 | 205 | 2,32 | 2 | 7E-4 | 0,1 | 0,08501 |
| 45 | 22 | 205 | 2,72 | 3 | 7E-4 | 30 | 0,027236 |
| 9 | 23 | 75 | 2,32 | 2 | 4E-4 | 0,1 | 0,05419 |
| 37 | 24 | 205 | 2,32 | 3 | 1E-3 | 30 | 0,028017 |
| 36 | 25 | 205 | 2,32 | 1 | 1E-3 | 30 | 0,022324 |
| 19 | 26 | 75 | 2,32 | 3 | 7E-4 | 0,1 | 0,084889 |
| 56 | 27 | 205 | 2,32 | 2 | 7E-4 | 30 | 0,021176 |
| 3 | 28 | 75 | 2,72 | 2 | 7E-4 | 0,1 | 0,084826 |
| 31 | 29 | 335 | 1,92 | 2 | 7E-4 | 30 | 0,020347 |
| 47 | 30 | 335 | 2,32 | 1 | 7E-4 | 30 | 0,020205 |
| 15 | 31 | 205 | 1,92 | 3 | 7E-4 | 0,1 | 0,085022 |
| 33 | 32 | 335 | 2,72 | 2 | 7E-4 | 30 | 0,027825 |
| 43 | 33 | 205 | 2,72 | 1 | 7E-4 | 30 | 0,020315 |
| 54 | 34 | 205 | 2,32 | 2 | 7E-4 | 30 | 0,021176 |
| 28 | 35 | 205 | 2,32 | 2 | 7E-4 | 0,1 | 0,08501 |
| 52 | 36 | 205 | 1,92 | 2 | 1E-3 | 30 | 0,022441 |
| 14 | 37 | 205 | 2,72 | 1 | 7E-4 | 0,1 | 0,084736 |
| 22 | 38 | 205 | 2,72 | 2 | 4E-4 | 0,1 | 0,054856 |
| 10 | 39 | 335 | 2,32 | 2 | 4E-4 | 0,1 | 0,054836 |
| 2 | 40 | 335 | 1,92 | 2 | 7E-4 | 0,1 | 0,084929 |
| 18 | 41 | 335 | 2,32 | 1 | 7E-4 | 0,1 | 0,084726 |
| 11 | 42 | 75 | 2,32 | 2 | 1E-3 | 0,1 | 0,11245 |
| 16 | 43 | 205 | 2,72 | 3 | 7E-4 | 0,1 | 0,086253 |
| 12 | 44 | 335 | 2,32 | 2 | 1E-3 | 0,1 | 0,11317 |
| 5 | 45 | 205 | 2,32 | 1 | 4E-4 | 0,1 | 0,054151 |
| 7 | 46 | 205 | 2,32 | 1 | 1E-3 | 0,1 | 0,11238 |
| 34 | 47 | 205 | 2,32 | 1 | 4E-4 | 30 | 0,014083 |
| 4 | 48 | 335 | 2,72 | 2 | 7E-4 | 0,1 | 0,085958 |

Suite à la prochaine page

| Std | Run | A | B | C | D | E | Pénétration mm |
|-----|-----|------------------|------|----------|---------------------------|-----------------------|-------------------|
| | | Durée μs | Mach | nb. tirs | Perméabilité μm^2 | Dia. pores μm | |
| 6 | 49 | 205 | 2,32 | 3 | 4E-4 | 0,1 | 0,054986 |
| 58 | 50 | 205 | 2,32 | 2 | 7E-4 | 30 | 0,021176 |
| 32 | 51 | 75 | 2,72 | 2 | 7E-4 | 30 | 0,019485 |
| 35 | 52 | 205 | 2,32 | 3 | 4E-4 | 30 | 0,01767 |
| 44 | 53 | 205 | 1,92 | 3 | 7E-4 | 30 | 0,02009 |
| 1 | 54 | 75 | 1,92 | 2 | 7E-4 | 0,1 | 0,08457 |
| 24 | 55 | 205 | 2,72 | 2 | 1E-3 | 0,1 | 0,11319 |
| 27 | 56 | 205 | 2,32 | 2 | 7E-4 | 0,1 | 0,08501 |
| 50 | 57 | 205 | 1,92 | 2 | 4E-4 | 30 | 0,014146 |
| 38 | 58 | 75 | 2,32 | 2 | 4E-4 | 30 | 0,013668 |

TAB. A.1: Plan d'expérience et résultats numériques de l'analyse théorique

Annexe B

DESSIN DE FABRICATION DU CYLINDRE PRESSURISÉ



FIG. B.2: Dessin de fabrication du corps du cylindre d'imprégnation

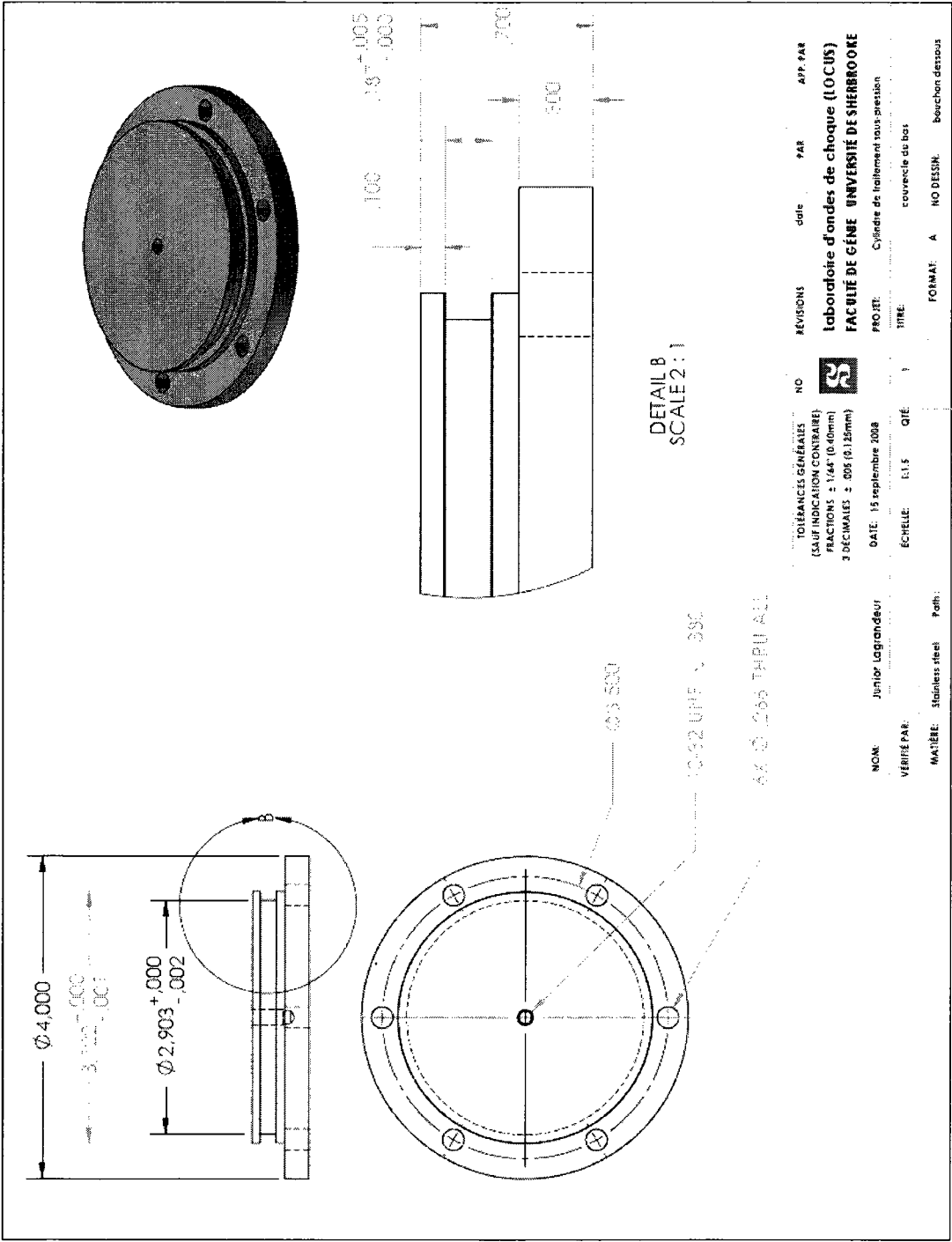


FIG. B.3: Dessin de fabrication du couvercle du bas du cylindre

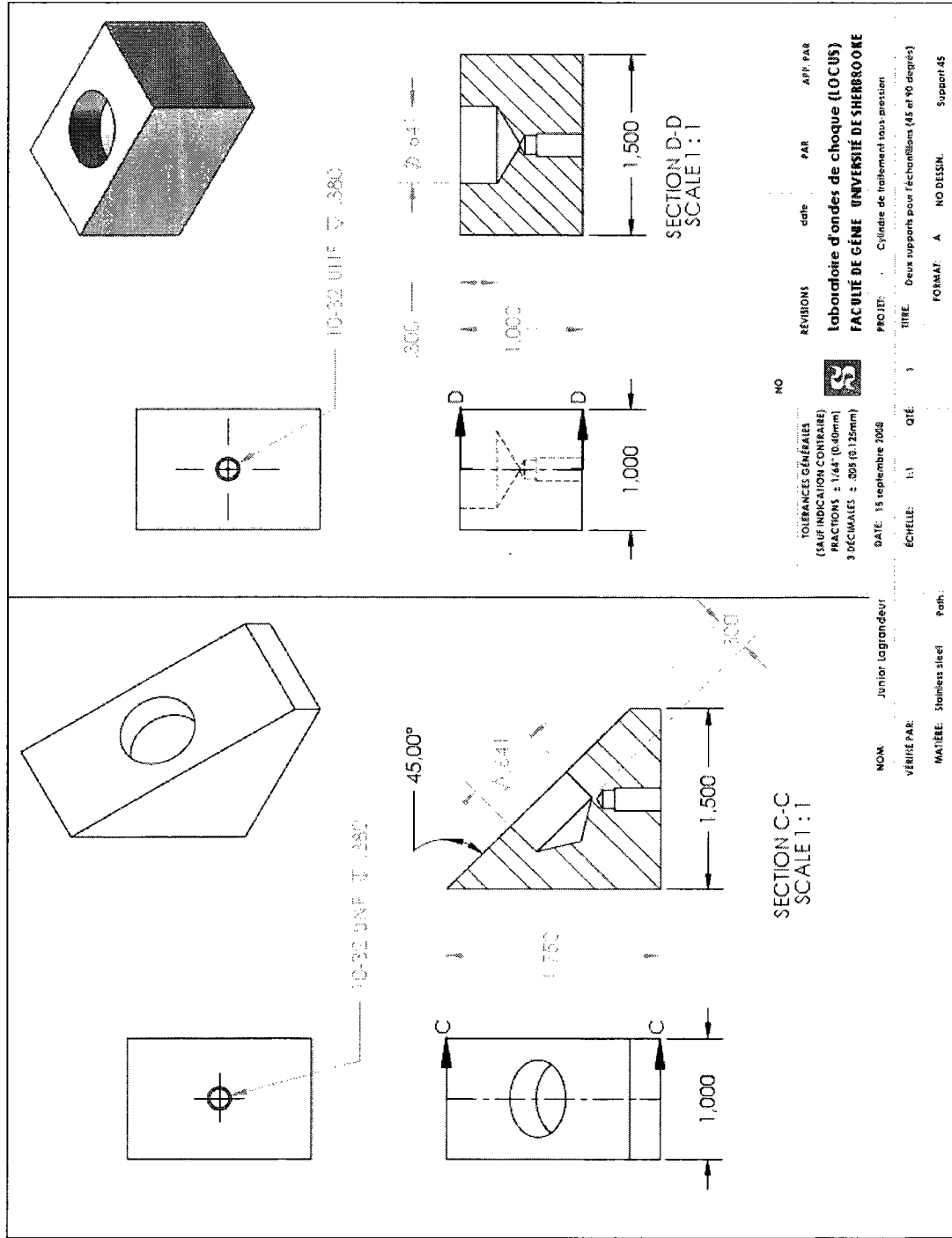


FIG. B.4: Dessin de fabrication des portes échantillons utilisés dans le cylindre d'imprégnation

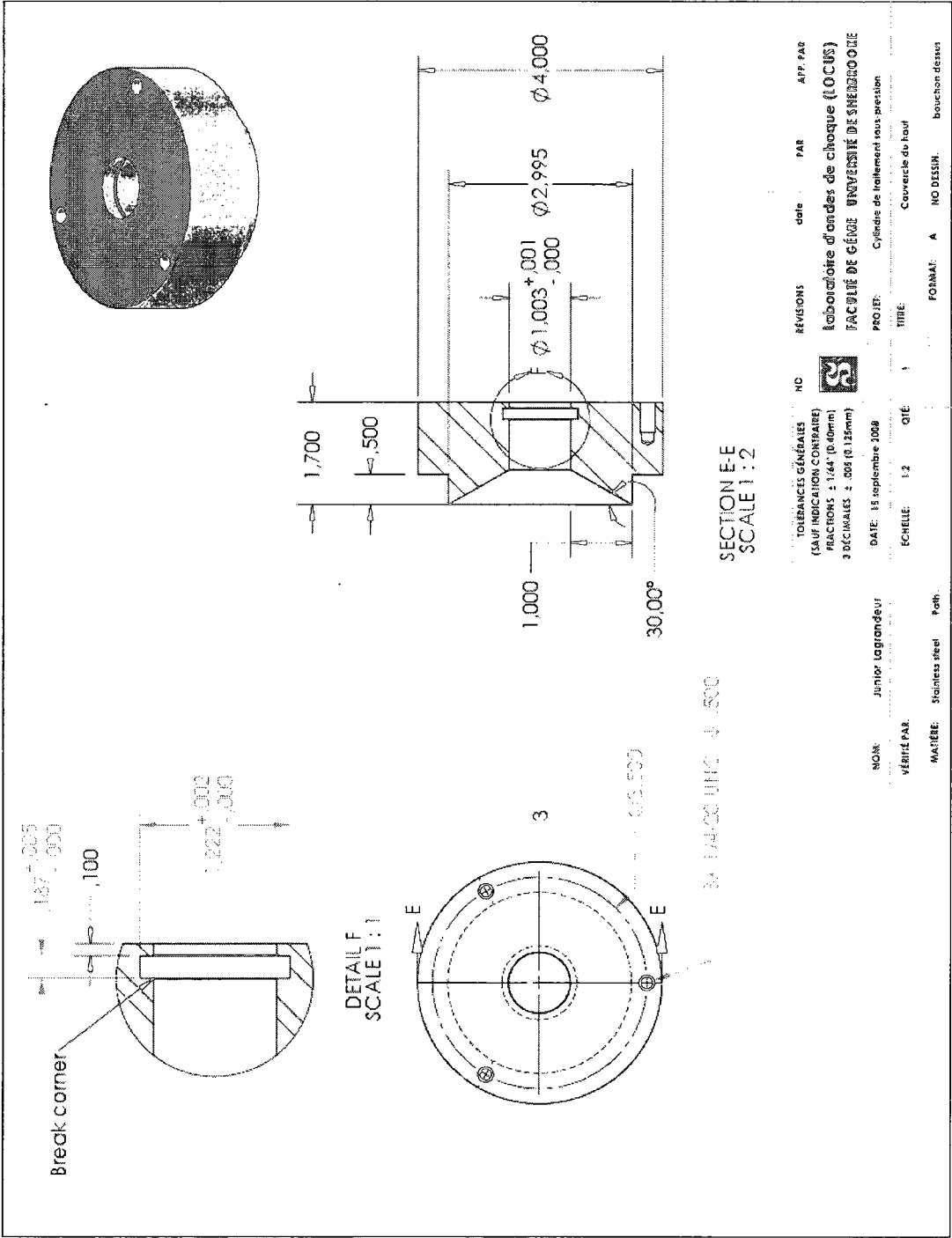


FIG. B.5: Dessin de fabrication de l'extrémité supérieure du cylindre de traitement

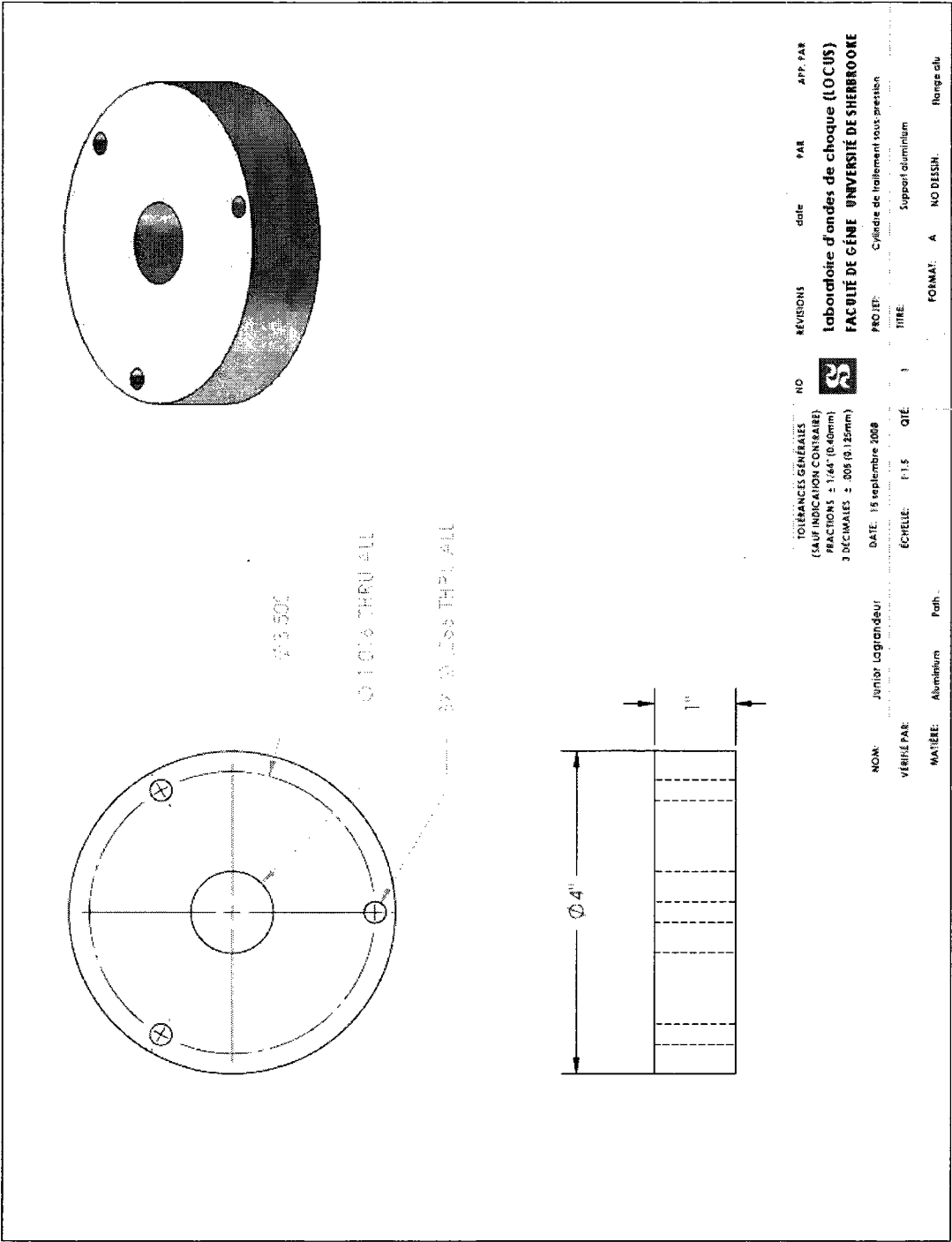


FIG. B.6: Dessin de fabrication du support du guide d'onde

Annexe C

PROVENANCE DES ÉCHANTILLONS MAISON

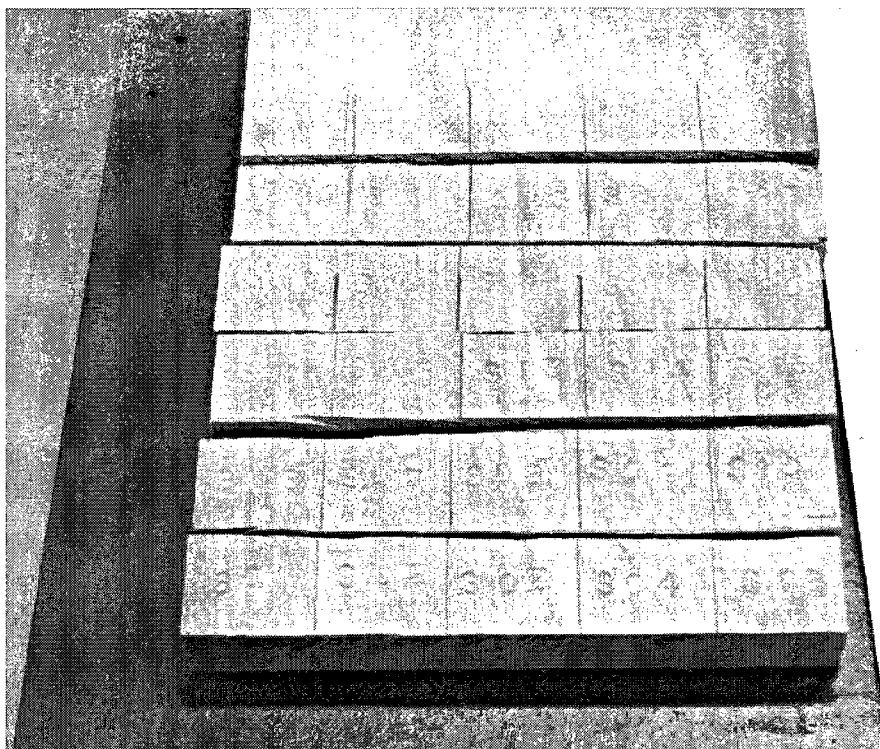


FIG. C.1: Vue de face des échantillons de merisier S01 à S25

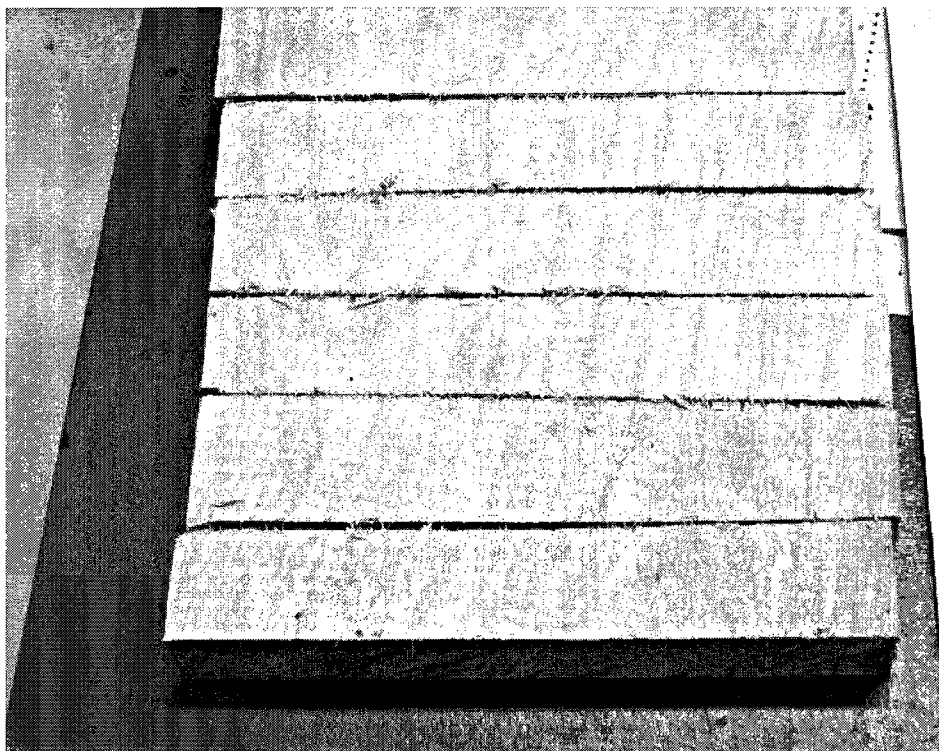


FIG. C.2: Vue de dos des échantillons de merisier S01 à S25

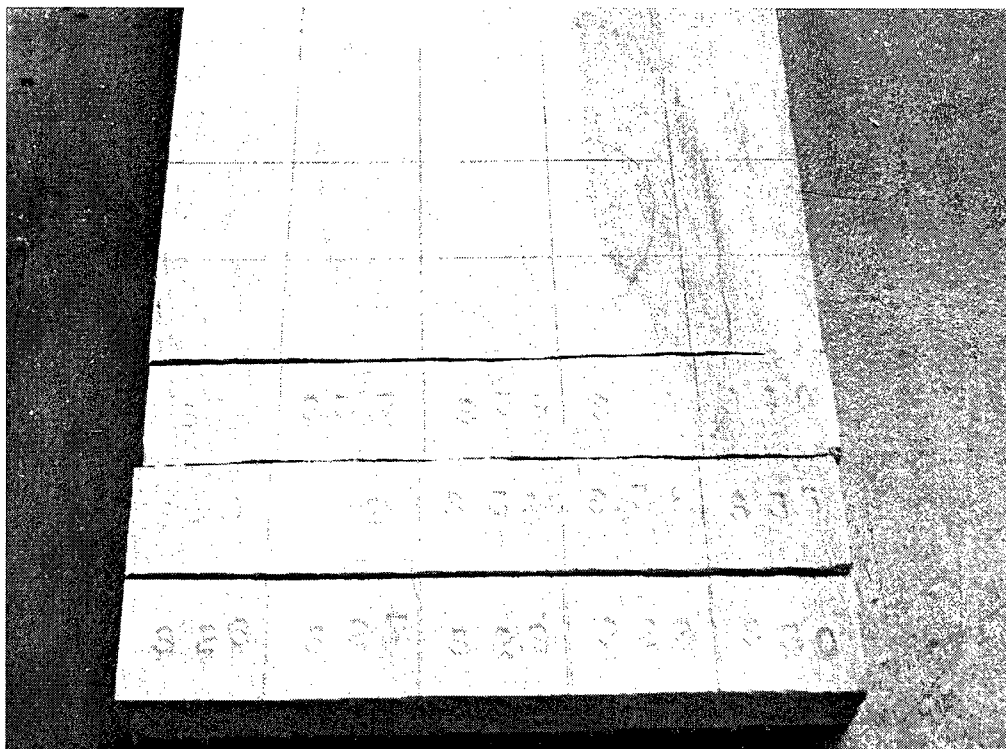


FIG. C.3: Vue de face des échantillons de merisier S26 à S40



FIG. C.4: Vue de dos des échantillons de merisier S26 à S40



FIG. C.5: Vue de face des échantillons de merisier S41 à S65

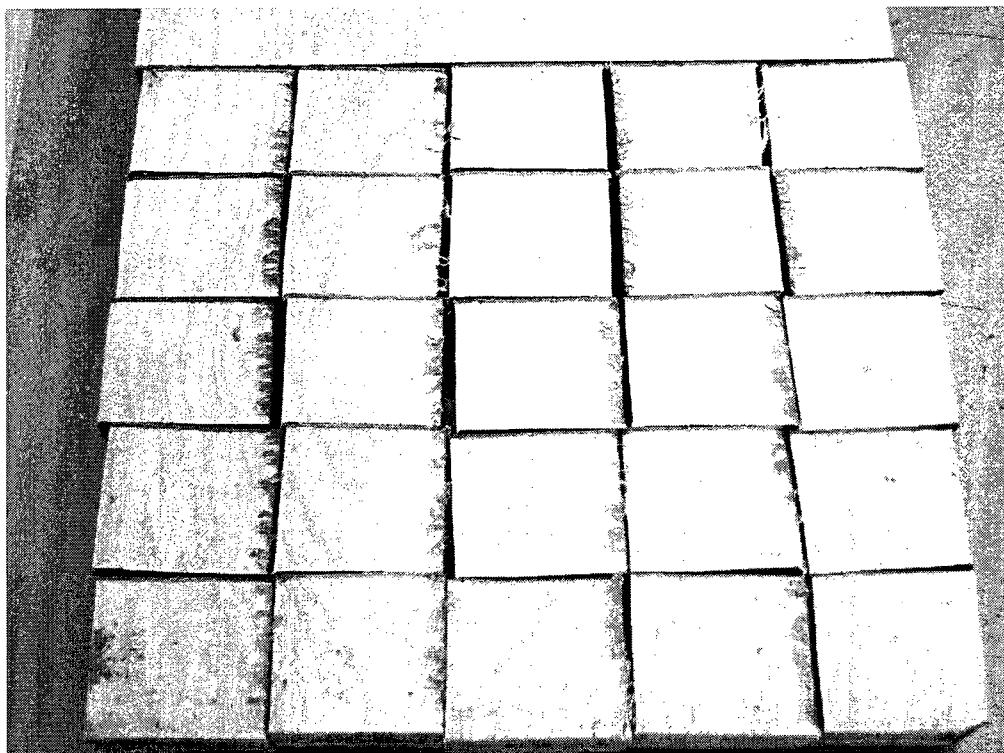


FIG. C.6: Vue de dos des échantillons de merisier S41 à S65

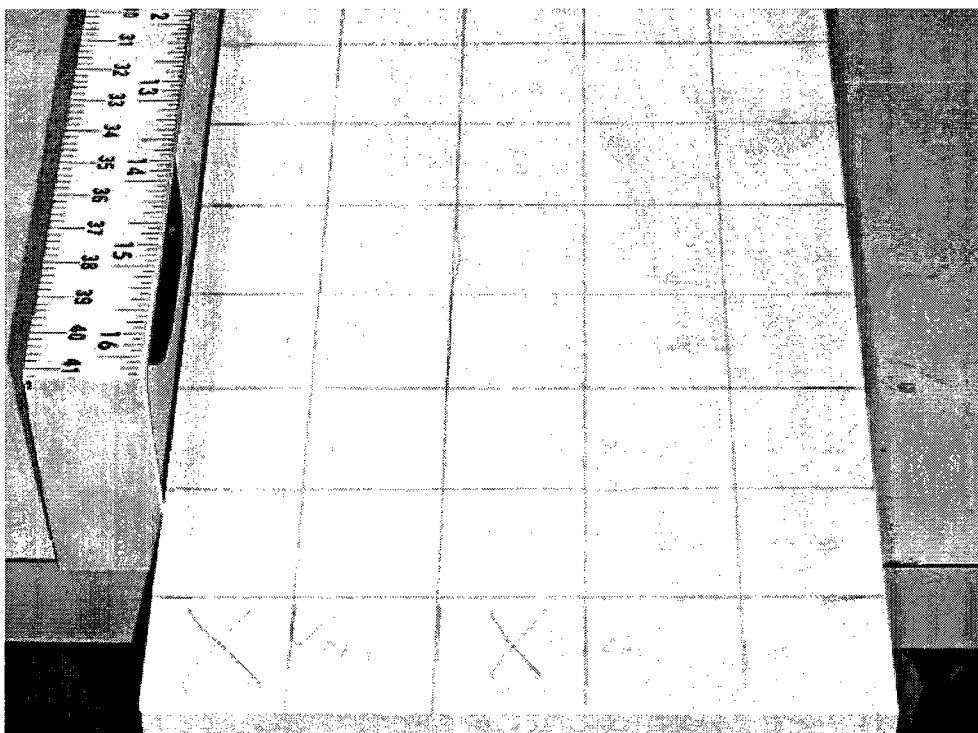


FIG. C.7: Vue de face des échantillons de merisier M1 à M33

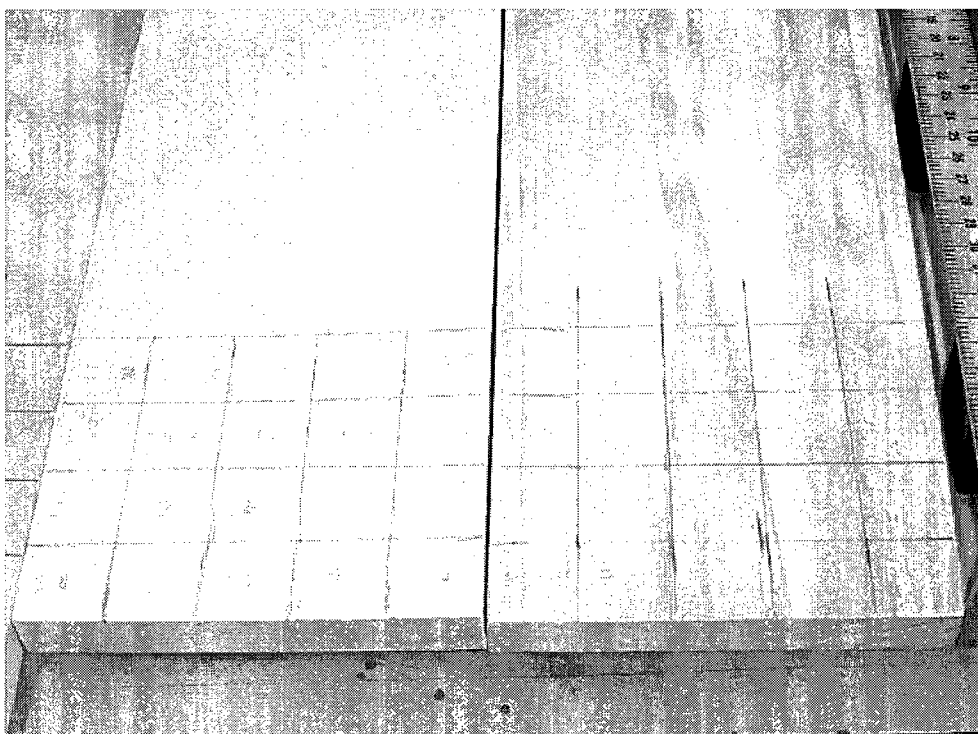


FIG. C.8: Vue de face des échantillons d'érable E1 à E20 (à gauche) et de peuplier P1 à P20 (à droite)

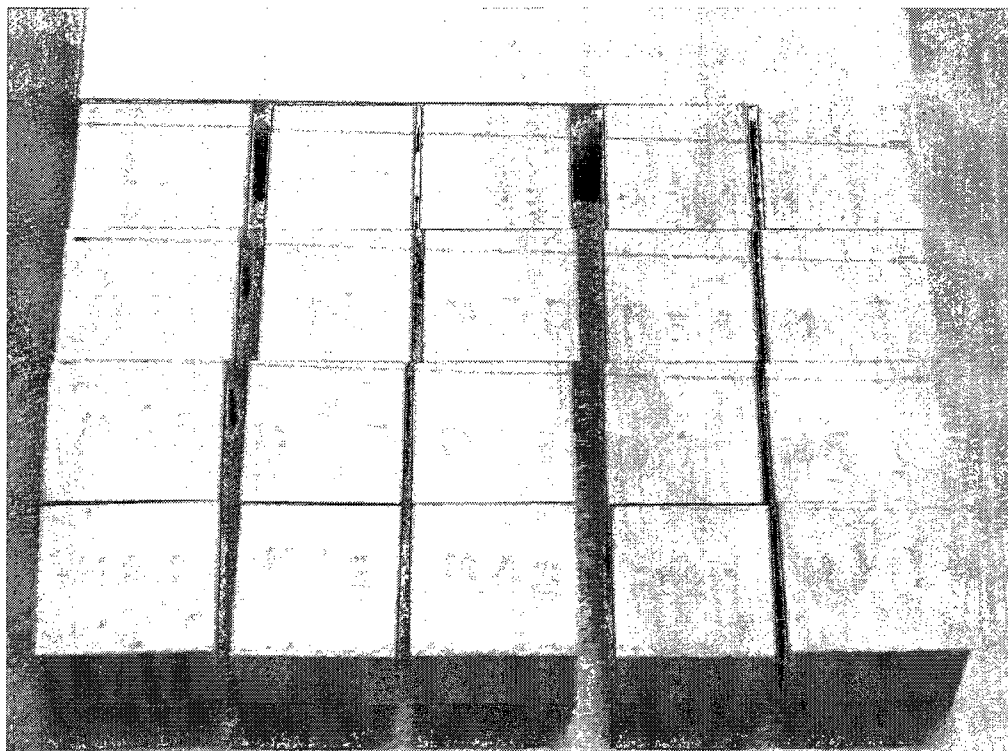


FIG. C.9: Vue de face des échantillons de merisier M41 à M60

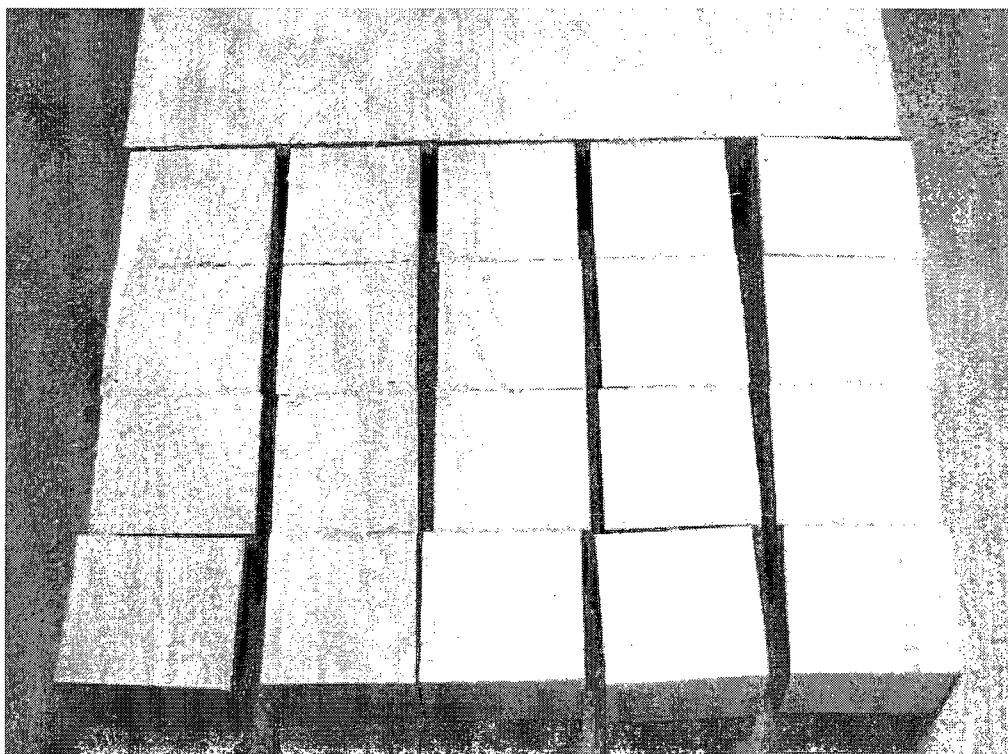


FIG. C.10: Vue de dos des échantillons de merisier M41 à M60

Annexe D

RÉSULTATS NUMÉRIQUES DES ESSAIS EXPÉRIMENTAUX

| Échantillon | A Nb. tirs | B Mach | C Gaz | 19/02/2007 Masse ini. g | 19/06/2009 Masse fin. g | Absorption g |
|-------------|---------------|-----------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|
| 4A | 2 | 2,1 | He | 11,5698 | 12,3274 | 0,7215 |
| 6A | 5 | 2,1 | He | 11,1869 | 12,0474 | 0,8196 |
| 6B | 2 | 1,75 | He | 11,0811 | 11,9755 | 0,8557 |
| 4B | 5 | 1,75 | He | 11,5086 | 12,2898 | 0,7457 |
| 6C | 2 | 2,1 | N ₂ | 10,9633 | 11,8542 | 0,7848 |
| 4C | 5 | 2,1 | N ₂ | 11,4343 | 12,2382 | 0,7448 |
| 4D | 2 | 1,75 | N ₂ | 11,3296 | 12,0586 | 0,6694 |
| 6D | 5 | 1,75 | N ₂ | 10,9196 | 11,8075 | 0,8420 |

TAB. D.1: Premier plan d'expérience et ses résultats numériques

| Std | Run | Bloc | A | | B | | Masse ini. | Masse fin. | Absorp. |
|-----|-----|------|--------|------|----------|---------|------------|------------|---------|
| | | | Échan. | Mach | Nb. tirs | | | | |
| | | | | | | g | g | g | |
| 13 | 1 | 1 | 2B | 1,75 | 3 | 10,581 | 10,7377 | 0,1567 | |
| 4 | 2 | 1 | 2C | 2,5 | 1 | 10,5307 | 10,6821 | 0,1514 | |
| 7 | 3 | 1 | 2D | 1,75 | 2 | 10,5264 | 10,6837 | 0,1573 | |
| 1 | 4 | 1 | 2E | 1,75 | 1 | 10,5895 | 10,7471 | 0,1576 | |
| 16 | 5 | 1 | 2F | 2,5 | 3 | 10,6039 | 10,8457 | 0,2418 | |
| 10 | 6 | 1 | 2TL | 2,5 | 2 | 10,6249 | 10,8171 | 0,1922 | |
| 14 | 7 | 2 | 8A | 1,75 | 3 | 9,093 | 9,3377 | 0,2447 | |
| 5 | 8 | 2 | 8B | 2,5 | 1 | 9,0056 | 9,2648 | 0,2592 | |
| 2 | 9 | 2 | 8C | 1,75 | 1 | 8,9701 | 9,1624 | 0,1923 | |
| 11 | 10 | 2 | 8D | 2,5 | 2 | 9,0098 | 9,4032 | 0,3934 | |
| 17 | 11 | 2 | 8E | 2,5 | 3 | 8,9002 | 9,3682 | 0,468 | |
| 8 | 12 | 2 | 8F | 1,75 | 2 | 9,1152 | 9,422 | 0,3068 | |
| 18 | 13 | 3 | 4E | 1,5 | 3 | 10,6539 | 10,8435 | 0,1896 | |
| 6 | 14 | 3 | 4F | 2,5 | 1 | 10,6874 | 10,8323 | 0,1449 | |
| 12 | 15 | 3 | 4TL | 2,5 | 2 | 10,8288 | 11,0149 | 0,1861 | |
| 9 | 16 | 3 | 6E | 1,75 | 2 | 10,3399 | 10,5165 | 0,1766 | |
| 3 | 17 | 3 | 6F | 1,75 | 1 | 10,4732 | 10,6117 | 0,1385 | |
| 15 | 18 | 3 | 6TL | 1,75 | 3 | 10,5797 | 10,7353 | 0,1556 | |

TAB. D.2: Plan d'expérience et résultats numériques des tests étudiant les effets de deuxième ordre sur le nombre de tirs. Les résultats sont présentés selon l'ordre standard (std) et l'ordre d'exécution des essais (run).

| Échan. | Std | Run | A | | Durée μs | B Mach | C nb. tirs | D Dégazage | Absorp. | | % à 10 mil. | | % à 30 mil. | |
|--------|-----|-----|-----|------|-------------|-----------|---------------|---------------|---------|-------|-------------|---|-------------|--|
| | | | | | | | | | mg | % | mg | % | | |
| 11A | 13 | 1 | 335 | 1,92 | 1 | 1 | non | | 128,5 | 47,28 | 24,82 | | | |
| 11B | 7 | 2 | 335 | 1,92 | 3 | 3 | oui | | 163,3 | 28,07 | 10,29 | | | |
| 11C | 8 | 3 | 75 | 1,92 | 3 | 3 | non | | 111,8 | 45,03 | 27,09 | | | |
| 11E | 11 | 4 | 75 | 2,72 | 1 | 1 | non | | 131,2 | 32,87 | 16,50 | | | |
| 11F | 4 | 5 | 335 | 2,72 | 3 | 3 | non | | 266,6 | 82,55 | 36,74 | | | |
| 11H | 14 | 6 | 75 | 2,72 | 3 | 3 | oui | | 137,0 | 47,60 | 21,61 | | | |
| 11I | 3 | 7 | 75 | 1,92 | 1 | 1 | oui | | 88,9 | 40,03 | 11,77 | | | |
| 11J | 2 | 8 | 335 | 2,72 | 1 | 1 | oui | | 162,9 | 40,58 | 15,41 | | | |
| 14A | 9 | 9 | 75 | 1,92 | 1 | 1 | non | | 83,1 | 45,50 | 11,29 | | | |
| 14B | 17 | 10 | 335 | 1,92 | 1 | 1 | oui | | 0,0568 | 32,98 | 10,57 | | | |
| 14C | 6 | 11 | 335 | 1,92 | 3 | 3 | non | | 87,4 | 75,94 | 28,62 | | | |
| 14E | 1 | 12 | 75 | 2,72 | 3 | 3 | non | | 172,8 | 82,78 | 44,51 | | | |
| 14F | 5 | 13 | 335 | 2,72 | 1 | 1 | non | | 86,5 | 30,60 | 13,50 | | | |
| 14G* | 10 | 14 | 205 | 2,32 | 2 | 2 | oui | | 132,2 | 79,28 | 42,28 | | | |
| 14H | 12 | 15 | 335 | 2,72 | 3 | 3 | oui | | 147,6 | 76,30 | 24,26 | | | |
| 14I | 15 | 16 | 75 | 1,92 | 3 | 3 | oui | | 127,8 | 78,32 | 28,06 | | | |
| 14J* | 16 | 17 | 75 | 2,72 | 1 | 1 | oui | | 218,4 | 76,16 | 39,32 | | | |
| 12A | 21 | 18 | 75 | 2,72 | 1 | 1 | oui | | 275,8 | 55,38 | 28,88 | | | |
| 12B | 20 | 19 | 75 | 1,92 | 1 | 1 | oui | | 229,5 | 60,02 | 27,50 | | | |
| 12C | 25 | 20 | 335 | 2,72 | 3 | 3 | oui | | 316,8 | 83,06 | 32,95 | | | |
| 12D* | 23 | 21 | 75 | 1,92 | 3 | 3 | oui | | 164,6 | 51,92 | 24,66 | | | |
| 12E* | 26 | 22 | 205 | 2,32 | 2 | 2 | non | | 217,1 | 79,64 | 28,74 | | | |

Suite à la prochaine page

| Échan. | Std | Run | A Durée μs | B Mach | C nb. tirs | D Dégazage | Absorp. mg | % à 10 mil. | % à 30 mil. |
|--------|-----|-----|-----------------------|-----------|---------------|---------------|---------------|-------------|-------------|
| 12F* | 19 | 23 | 335 | 2,72 | 3 | non | 121,1 | 41,42 | 9,20 |
| 12G* | 22 | 24 | 335 | 1,92 | 1 | non | 167,9 | 44,72 | 24,04 |
| 12H* | 18 | 25 | 335 | 2,72 | 1 | non | 187,6 | 50,12 | 14,93 |
| 12I* | 24 | 26 | 335 | 1,92 | 3 | non | 132,3 | 48,69 | 6,09 |
| 13A | 32 | 27 | 335 | 1,92 | 3 | oui | 242,9 | 89,01 | 37,50 |
| 13B* | 35 | 28 | 205 | 2,12 | 2 | non | 292,6 | 89,30 | 63,44 |
| 13C | 30 | 29 | 335 | 2,72 | 1 | oui | 239,3 | 53,89 | 12,36 |
| 13D* | 34 | 30 | 75 | 2,47 | 3 | oui | 269,7 | 91,31 | 63,60 |
| 13E* | 29 | 31 | 75 | 2,37 | 2 | non | 258,5 | 89,88 | 51,21 |
| 13F | 31 | 32 | 75 | 1,92 | 3 | non | 263,7 | 84,55 | 47,50 |
| 13H | 28 | 33 | 335 | 1,65 | 1 | oui | 298,9 | 78,54 | 49,17 |
| 13I | 27 | 34 | 75 | 1,92 | 1 | non | 260,7 | 89,82 | 52,24 |
| 13J | 33 | 35 | 75 | 2,72 | 3 | non | 293,1 | 82,77 | 48,19 |

TAB. D.3: Plan d'expérience et résultats numériques des essais à quatre facteurs. Ce tableau présente, selon l'ordre standard (std) et l'ordre de test (run), l'absorption mesurée au laboratoire et le pourcentage de pixels colorés mesuré par le CRIQ à 10 millèmes et à 30 millèmes de profondeur. Note : les résultats provenant des échantillons marqués d'une * présentaient des irrégularités pour des raisons diverses. Ils n'ont pas été retenus pour l'analyse de la variance.

| Échan. Std Run | | A | | B | | C | | D | | Absorp. Péné. moy. | |
|----------------|----|-------|---------|------|----------|----------|--------|---------|--|--------------------|--|
| | | Durée | μs | Mach | nb. tirs | Dégazage | mg | mil. po | | | |
| 16A | 17 | 1 | 205 | 2,32 | 2 | non | 181,8 | 20,3 | | | |
| 16B | 5 | 2 | 75 | 1,92 | 3 | non | 173,1 | 47,3 | | | |
| 16C | 9 | 3 | 75 | 1,92 | 1 | non | 197,8 | 8,1 | | | |
| 16D | 14 | 4 | 35 | 1,92 | 3 | oui | 223,3 | 15,8 | | | |
| 16E | 2 | 5 | 335 | 1,92 | 1 | non | 165,3 | 9,1 | | | |
| 16F | 12 | 6 | 335 | 2,72 | 1 | oui | 182,2 | 15,2 | | | |
| 16G | 15 | 7 | 75 | 2,72 | 3 | oui | 199,2 | 16,1 | | | |
| 16H | 3 | 8 | 75 | 2,72 | 1 | non | 204,7 | 7,8 | | | |
| 16I | 8 | 9 | 335 | 2,72 | 3 | non | 301,9 | 19,3 | | | |
| 15A | 6 | 10 | 335 | 1,92 | 3 | non | 223,9 | 19,2 | | | |
| 15B* | 18 | 11 | 205 | 2,32 | 2 | oui | 229,5 | 24,2 | | | |
| 15C | 13 | 12 | 75 | 1,92 | 3 | oui | 262,2 | 42,47 | | | |
| 15D | 10 | 13 | 335 | 1,92 | 1 | oui | 201,9 | 29,8 | | | |
| 15E | 4 | 14 | 335 | 2,72 | 1 | non | 210,0 | 33,7 | | | |
| 15F* | 7 | 15 | 75 | 2,72 | 3 | non | 250,5 | 22,8 | | | |
| 15G* | 11 | 16 | 75 | 2,72 | 1 | oui | 234,4 | 37,9 | | | |
| 15H | 16 | 17 | 335 | 2,72 | 3 | oui | 313,7 | 43,5 | | | |
| 15I | 1 | 18 | 75 | 1,92 | 1 | non | 0,2268 | 35,3 | | | |

TAB. D.4: Plan d'expérience et résultats numériques des deux dernières séries d'essais à quatre facteurs. Pour ces deux séries, la pénétration a été mesurée au laboratoire à l'aide de la méthode décrite à la section 4.3.2. Note : les résultats provenant des échantillons marqués d'une * présentaient des irrégularités pour des raisons diverses. Ils n'ont pas été retenus pour l'analyse de la variance.

| Échan. | Run | Std | Bloc | Date | B Mach | C nb. tirs | Dens. ini. g/cm ³ | Dens. fin. g/cm ³ | Absorp. g/cm ³ | Péné moy. po | Dureté N |
|--------|-----|-----|------|------------|-----------|---------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|--------------------|-------------|
| PE16 | 1 | 29 | 1 | 9/07/2008 | 2,51 | 3 | 0,506 | 0,515 | 0,0091 | 0,0248 | |
| E11 | 2 | 15 | 1 | 9/07/2008 | 2,49 | 1 | 0,667 | 0,673 | 0,0212 | 0,0067 | |
| W1 | 3 | 27 | 1 | 9/07/2008 | 2,53 | 3 | 0,570 | 0,623 | 0,0523 | 0,1144 | 4831 |
| M1X | 4 | 25 | 1 | 9/07/2008 | 2,41 | 3 | 0,578 | 0,612 | 0,0333 | 0,0605 | 5179 |
| M26 | 5 | 1 | 1 | 9/07/2008 | 1,89 | 1 | 0,597 | 0,616 | 0,0191 | 0,0378 | 4623 |
| E9 | 6 | 31 | 1 | 9/07/2008 | 2,52 | 3 | 0,675 | 0,681 | 0,0055 | 0,0077 | |
| PE11 | 7 | 13 | 1 | 9/07/2008 | 2,51 | 1 | 0,501 | 0,517 | 0,0160 | 0,0311 | |
| E17 | 8 | 23 | 1 | 9/07/2008 | 1,90 | 3 | 0,680 | 0,683 | 0,0029 | 0,0151 | |
| W4 | 9 | 19 | 1 | 9/07/2008 | 1,91 | 3 | 0,597 | 0,630 | 0,0326 | 0,0258 | 4705 |
| PE6 | 10 | 5 | 1 | 9/07/2008 | 1,94 | 1 | 0,506 | 0,515 | 0,0092 | 0,0222 | |
| W5 | 11 | 11 | 1 | 9/07/2008 | 2,55 | 1 | 0,558 | 0,586 | 0,0280 | 0,0193 | 4446 |
| PE19 | 12 | 21 | 1 | 11/07/2008 | 1,87 | 3 | 0,489 | 0,505 | 0,0161 | 0,0136 | |
| M9 | 13 | 17 | 1 | 11/07/2008 | 1,89 | 3 | 0,571 | 0,607 | 0,0354 | 0,0619 | 5166 |
| E12 | 14 | 7 | 1 | 11/07/2008 | 1,93 | 1 | 0,674 | 0,677 | 0,0027 | 0,0169 | |
| M21 | 15 | 25 | 1 | 11/07/2008 | 2,52 | 3 | 0,586 | 0,617 | 0,0308 | 0,0471 | 4673 |
| W6 | 16 | 3 | 1 | 11/07/2008 | 1,89 | 1 | 0,595 | 0,627 | 0,0316 | 0,0546 | 4528 |
| M5 | 17 | 9 | 1 | 11/07/2008 | 2,54 | 1 | 0,568 | 0,585 | 0,0169 | 0,0777 | 4591 |
| PE1* | 18 | 30 | 2 | 12/08/2008 | 2,51 | 3 | 0,514 | 0,537 | 0,0226 | 0,0492 | |
| PE12 | 19 | 6 | 2 | 12/08/2008 | 1,89 | 1 | 0,493 | 0,503 | 0,0096 | 0,0306 | |
| E1 | 20 | 24 | 2 | 12/08/2008 | 1,91 | 3 | 0,669 | 0,677 | 0,0085 | 0,0456 | |
| W8 | 21 | 28 | 2 | 12/08/2008 | 2,51 | 3 | 0,596 | 0,650 | 0,0537 | 0,1219 | 4926 |
| PE15 | 22 | 14 | 2 | 12/08/2008 | 2,50 | 1 | 0,489 | 0,509 | 0,0201 | 0,0321 | |

Suite à la prochaine page

| Échan. | Std | Run | Bloc | Date | B Mach | C nb. tirs | Dens. ini. g/cm ³ | Dens. fin. g/cm ³ | Absorp. g/cm ³ | Péné moy. po | Dureté N |
|--------|-----|-----|------|------------|-----------|---------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|--------------------|-------------|
| M19 | 23 | 18 | 2 | 12/08/2008 | 1,87 | 3 | 0,572 | 0,593 | 0,0200 | 0,0288 | 4957 |
| W3 | 24 | 12 | 2 | 12/08/2008 | 2,47 | 1 | 0,566 | 0,612 | 0,0463 | 0,0672 | 4926 |
| M12 | 25 | 26 | 2 | 14/08/2008 | 2,50 | 3 | 0,554 | 0,577 | 0,0224 | 0,0746 | 4907 |
| W2 | 26 | 4 | 2 | 14/08/2008 | 1,88 | 1 | 0,563 | 0,603 | 0,0399 | 0,0675 | 5002 |
| E5 | 27 | 32 | 2 | 14/08/2008 | 2,51 | 3 | 0,644 | 0,651 | 0,0068 | 0,0107 | |
| E19 | 28 | 16 | 2 | 14/08/2008 | 2,52 | 1 | 0,641 | 0,646 | 0,0047 | 0,0185 | |
| PE20 | 29 | 22 | 2 | 14/08/2008 | 1,90 | 3 | 0,466 | 0,480 | 0,0143 | 0,0250 | |
| M16 | 30 | 10 | 2 | 14/08/2008 | 2,52 | 1 | 0,564 | 0,594 | 0,0304 | 0,0498 | 4768 |
| W7 | 31 | 20 | 2 | 14/08/2008 | 1,90 | 3 | 0,581 | 0,615 | 0,0340 | 0,0537 | 4686 |
| M18 | 32 | 2 | 2 | 14/08/2008 | 1,87 | 1 | 0,562 | 0,594 | 0,0322 | 0,1001 | 5355 |
| E10 | 33 | 8 | 2 | 14/08/2008 | 1,87 | 1 | 0,635 | 0,637 | 0,0026 | 0,0094 | |
| W13 | | | 3 | 19/09/2008 | 2,50 | 3 | 0,609 | 0,605 | -0,0038 | 0,0304 | 4547 |
| M51 | | | 3 | 19/09/2008 | 1,84 | 3 | 0,614 | 0,608 | -0,0057 | 0,0079 | 4721 |
| M41 | | | 3 | 19/09/2008 | 1,84 | 1 | 0,612 | 0,603 | -0,0085 | 0,0075 | 5187 |
| W11 | | | 3 | 19/09/2008 | 1,87 | 3 | 0,628 | 0,621 | -0,0073 | 0,0090 | 4736 |
| W10 | | | 3 | 19/09/2008 | 2,52 | 1 | 0,629 | 0,622 | -0,0072 | 0,0154 | 4389 |
| M56 | | | 3 | 19/09/2008 | 2,51 | 3 | 0,607 | 0,604 | -0,0036 | 0,0085 | 4627 |
| W12 | | | 3 | 19/09/2008 | 1,80 | 1 | 0,621 | 0,612 | -0,0077 | 0,0241 | 4800 |
| M57 | | | 3 | 19/09/2008 | 2,59 | 1 | 0,619 | 0,611 | -0,0078 | 0,0338 | 4547 |

TAB. D.5: Plan d'expérience et résultats numériques pour les essais avec du peuplier (PE), de l'érable (E), du merisier (M) et du merisier prétraité aux micro-ondes (W). Note : les résultats provenant des échantillons marqués d'une * présentaient des irrégularités pour des raisons diverses. Ils n'ont pas été retenus pour l'analyse de la variance.

| Std | Run | Bloc | A Angle d'inci. ° | B Cycle P. | C Prétraitement | Absorption g/cm ³ |
|-----|-----|------|-------------------------|---------------|--------------------|---------------------------------|
| 13 | 1 | 1 | sans | trempe | avec | -0,0068 |
| 1 | 2 | 1 | sans | trempe | sans | -0,0041 |
| 17 | 3 | 1 | 90 | trempe | avec | -0,0090 |
| 11 | 4 | 1 | 90 | Bethel | sans | 0,0041 |
| 9 | 5 | 1 | 45 | Bethel | sans | 0,0095 |
| 15 | 6 | 1 | 45 | trempe | avec | -0,0069 |
| 21 | 7 | 1 | 45 | Bethel | avec | 0,0026 |
| 19 | 8 | 1 | sans | Bethel | avec | -0,0014 |
| 5 | 9 | 1 | 90 | trempe | sans | -0,0042 |
| 7 | 10 | 1 | sans | Bethel | sans | 0,0043 |
| 23 | 11 | 1 | 90 | Bethel | avec | 0,0054 |
| 3 | 12 | 1 | 45 | trempe | sans | -0,0055 |
| 4 | 13 | 2 | 45 | trempe | sans | -0,0051 |
| 22 | 14 | 2 | 45 | Bethel | avec | -0,0001 |
| 12 | 15 | 2 | 90 | Bethel | sans | 0,0031 |
| 18 | 16 | 2 | 90 | trempe | avec | -0,0093 |
| 20 | 17 | 2 | sans | Bethel | avec | 0,0035 |
| 2 | 18 | 2 | sans | trempe | sans | -0,0069 |
| 14 | 19 | 2 | sans | trempe | avec | -0,0095 |
| 16 | 20 | 2 | 45 | trempe | avec | -0,0092 |
| 8 | 21 | 2 | sans | Bethel | sans | 0,0082 |
| 10 | 22 | 2 | 45 | Bethel | sans | -0,0018 |
| 6 | 23 | 2 | 90 | trempe | sans | -0,0069 |
| 24 | 24 | 2 | 90 | Bethel | avec | 0,0037 |

TAB. D.6: Plan d'expérience et résultats numériques des tests réalisés avec le cylindre sous-pression. Le plan d'expérience fait varier l'angle d'incidence des ondes (45°, 90° ou aucune ondes émises), le cycle de pression statique et si les échantillons de merisier ont été prétraités aux micro-ondes.

Bibliographie

- ARUNKUMAR, A. N. SRINIVASA, Y. B. RAVIKUMAR, G. SHANKARANA-RAYANA, K. H. RAO, K. S. et JAGADEESH, G. (2005). A new shock wave assisted sandalwood oil extraction technique. In *Shock Waves, Proceedings of the 25th International Symposium on Shock Waves-ISSW25* s.p., p., Berlin (2005). Indian Institute of science, Society for Shock-Wave Research.
- ASHRAE (1990). Ashrae guideline 2-1986 (ra 90) : Engineering analysis of experimental data.
- AVRAMIDIS, S. (1988). Experiments on the effect of ultrasonic energy on the absorption of preservatives by wood. *Wood and fiber science*, vol. 20, n° 3, p. 397–403.
- BEAR, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. New York, American Elsevier Pub. Co.
- BORGIN, K. et CORBETT, K. (1970). Improvement of capillary penetration of liquids into wood by use of supersonic waves. *Wood Science and Technology*, vol. 4, n° 3, p. 189–194.
- BROUILLETTE, M. (2003). Shock waves at microscales. *Shock Waves*, vol. 13, n° 1, p. 3–12.
- BURDELL, C. A. et BARNETT, J. H. (1969). Pilot plant evaluation of shock - wave pressure treatments. In *Proc., annual meeting of the American Wood-Preservers Association*, vol. 65, p. 174–189, Birmingham (1969). AWWA.
- CARON, M. (2006). L'entreprise de fabrication de meubles du futur - technologie. Rapport technique 56 p., Forintek Canada Corp., Québec.
- CHAPELON, J.-Y. CATHIGNOL, D. CAIN, C. EBBINI, E. KLUIWSTRA, J.-U. SAPOZHNIKOV, O. FLEURY, G. BERRIET, R. CHUPIN, L. et GUEY, J. (2000). New piezoelectric transducer for therapeutic ultrasound. *Ultrasound in Medicine & Biology*, vol. 26, n° 1, p. 153–159.
- CUMMINGS, J. C. (1974). Development of a high-performance cryogenic shock tube. *Journal of fluid mechanics*, vol. 66, n° 1, p. 177–187.

- DION, S. (2006). Conception, fabrication et essai d'un émetteur/récepteur unidimensionnel pour un lithotripeur extracorporel à onde de choc intelligent. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada.
- DULLIEN, F. A. L. (1992). *Porous Media; Fluid Transport and Pore Structure*. San Diego, Academic press inc., 2me édition édition.
- EMANUEL, G. SATYANAND, U. S. et LU, F. K. (2005). Performance of a shock tube with a large-area contraction. *AIAA journal*, vol. 43, n° 9, p. 1995–1999.
- ENVIRONNEMENTCANADA (2008). Archives nationales d'informations et de données climatologiques. internet. http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/Welcome_f.html.
- EVANS, P. (2003). Emerging technologies in wood protection. *Forest products journal*, vol. 53, n° 1, p. 14–22.
- FERRARA, G. FERRARI, L. et LUCIA, M. D. (2003). A new-conception, electromagnetically controlled, diaphragmless shock tube. In *Proceeding of the ASME Turbo Expo*, vol. 1, p. 377–384, New York (2003).
- FREEMAN, M. H. SHUPE, T. F. VLOSKY, R. P. et BARNES, H. M. (2003). Past, present, and future of the wood preservation industry. *Forest products journal*, vol. 53, n° 10, p. 8–15.
- HANSMANN, C. (2002). Permeability of wood - a review. *Drevársky výskum*, vol. 47, n° 4, p. 1–16.
- HARTMANN, W. et KIESER, J. (2002). Apparatus for producing shock waves for technical, preferably medical applications. brevet.
- HARTMANN, W. KIESER, J. et ROHDE, K. D. (2000). Thermohydraulic generator - a pulse power source of intense pressure pulses. *IEEE transactions on plasma science*, vol. 28, n° 5, p. 1558–1562.
- HENRY, E. BATANI, D. KOENIG, M. BENUZZI, A. MASCLET, I. REBEC, M. REVERDIN, C. CELLIER, P. SILVA, L. D. et CAUBLE, R. (2001). Equation of state of water in the megabar range. *Laser and particle beams*, vol. 19, n° 1, p. 111–115.
- HOADLEY, R. B. (1990). *Identifying wood : accurate results with simple tools*. The Taunton Press.
- HONG, X. WANG, S. GUO, D. WU, H. WANG, J. DAI, Y. XIA, X. et XIE, Y. (1998). Confining medium and absorptive overlay : Their effects on a laser-induced shock wave. *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 29, n° 6, p. 447–455.
- IKEDA, T. YOSHIZAWA, S. TOSAKI, M. ALLEN, J. S. TAKAGI, S. OHTA, N. KITAMURA, T. et MATSUMOTO, Y. (2006). Cloud cavitation control for lithotripsy using high intensity focused ultrasound. *Journal of ultrasound in Medicine and biology*, vol. 32, n° 9, p. 1383–1397.

- INCROPERA, F. P. et DEWITT, D. P. (2002). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Hoboken, Wiley, fifth edition édition.
- ISO3350 (1975). Bois - détermination de la dureté statique.
- ITOH, S. NAGANO, S. FUJITA, M. et TAKANO, T. (1998). Underwater shock wave loading on wood. In *Proc : ASME PVP*, vol. 377, p. 231–235, New York (1998). American Society of Mechanical Engineers.
- ITOH, S. NAGANO, S. NAGAHARA, M. KUROYAMA, Y. NAKACHI, A. et SUMIYA, F. (2001). Field tests for underwater shock loading on karamatsu wood. In *Proc : ASME PVP*, vol. 431, p. 165–170, New York (2001). American Society of Mechanical Engineers.
- JAGADEESH, G. (2005). Application of shock waves in pencil manufacturing industry. In *Shock Waves, Proceedings of the 25th International Symposium on Shock Waves-ISSW25* s.p., p., Berlin (2005). Indian Institute of Science - Bangalore, Society for Shock-Wave Research.
- JAGADEESH, G. et TAKAYAMA, K. (2002). Novel applications of micro-shock waves in biological sciences. *Journal of the indian institute of science*, vol. 82, n° 1, p. 49.
- JOHNSON, D. L. KOPLIK, J. et DASHEN, R. (1987). Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *Journal of fluid mechanics*, vol. 176, p. 379–402.
- LEVY, A. BEN-DOR, G. SKEWS, B. W. et SOREK, S. (1993). Head-on collision of normal shock waves with rigid porous materials. *Experiments in Fluids*, vol. 15, n° 3, p. 183–190.
- LI, H. LEVY, A. et BEN-DOR, G. (1995). Head-on interaction of planar shock waves with ideal rigid open-cell porous materials. analytical model. *Fluid Dynamics Research*, vol. 16, n° 4, p. 203–215.
- LOWER, S. K. (2007). H₂O : A gentle introduction to the structure of water. www.chem1.com/acad/sci/aboutwater.html.
- MALAMUD, G. LEVI-HEVRONI, D. et LEVY, A. (2003). Two-dimensional model for simulating shock-wave interaction with rigid porous materials. *AIAA journal*, vol. 41, n° 4, p. 663–673.
- MARCOK, M. et KURJATKO, S. (1996). Effect of ultrasonic waves on the penetration of creosote into spruce wood. *Acustica*, vol. 82, n° 2, p. 368–370.
- MEIJER, M. D. THURICH, K. et MILITZ, H. (2001). Quantitative measurements of capillary coating penetration in relation to wood and coating properties. *Holz als Roh- und Werkstoff*, vol. 59, n° 1, p. 35–45.

- MEYLAN, B. A. et BUTTERFIELD, B. G. (1972). *Three-dimensional Structure of Wood - A Scanning Electron Microscope Study*. Syracuse, Syracuse University Press.
- MICHAUD, J. R. LAPOINTE, D. CÔTÉ, M. et LEDUC, J. (2006). *Perdure_{MD} : Traitement du bois à haute température. Environnement Innovation technologique* 4, p.
- MINTSEV, V. B. et FORTOV, V. E. (1982). Explosion-driven shock tubes (review). *High temperature*, vol. 20, n° 4, p. 623–645.
- MONTGOMERY, D. C. (2005). *Design and Analysis of Experiments*. Wiley, 6^e édition.
- MYERS, C. (1970). Wood impregnation. brevet US 3551190.
- NADEAU, J. B. (2006). Bois nouveau. *Québec science*, vol. 45, n° 4, p. 16–23.
- NAIR, H. U. et SIMONSEN, J. (1994). Sonic wood treatment, results at low frequency. In *Proc., annual meeting of the American Wood-Preservers Association*, vol. 90, p. 292–299, Birmingham (1994). American Wood Preserver Association.
- NAIR, H. U. et SIMONSEN, J. (1995). The pressure treatment of wood with sonic waves. *Forest products journal*, vol. 45, n° 9, p. 59–63.
- NOSE, H. MAEDA, H. et NAKAHARA, M. (2004). Observation and application of laser induced shock wave. In *Proc., international conference on advanced information networking and application*, vol. 2, p. 215–218, Piscataway (2004).
- NUSSBAUM, R. M. SUTCLIFFE, E. J. et HELLGREN, A. C. (1998). Microautoradiographic studies of the penetration of alkyd, alkyd emulsion and linseed oil coatings into wood. *JCT, Journal of coatings technology*, vol. 70, n° 878, p. 49–57.
- OLSSON, T. MEGNIS, M. VARNA, J. et LINDBERG, H. (2001). Study of the transverse liquid flow path in pine and spruce using scanning electron microscopy. *Journal of Wood Science*, vol. 47, p. 282–288.
- ONODERA, H. (1992). Double piston shock-wave valve. *AIAA journal*, vol. 30, n° 10, p. 2569–2571.
- OTSUKA, M. (2005). High-speed photographic investigation of underwater shock wave due to electric pulse power. In *Proceedings of SPIE—the international society for optical engineering*, vol. 5580 203, p. (2005).
- OTSUKA, M. WATANABE, T. et ITOH, S. (2006). Numerical simulation for development of pressure vessel for food processing by shock loading. In *Proc : ASME PVP*, vol. 2006, p. 319–324, New York (2006). American Society of Mechanical Engineers.
- PAGE, R. Z. et REED, B. E. (1969). Method of impregnating wood. brevet US 3467546.

- RAO, K. S. RAVIKUMAR, G. LAL, R. et JAGADEESH, G. (2005). A new shock wave assisted wood preservative injection system. In *Shock Waves, Proceedings of the 25th International Symposium on Shock Waves-ISSW25* s.p., p., Berlin (2005). Society for Shock-Wave Research.
- REICHENBERGER, H. et NASER, G. (1986). Electromagnetic acoustic source for the extracorporeal generation of shock waves in lithotripsy. *Siemens Forschungsund Entwicklungsberichte*, vol. 15, n° 4, p. 187–194.
- RESCH, H. (1967). Unsteady-state flow of compressible fluids through wood. *Forest products journal*, p. 48–54.
- SANKIN, G. N. (2003). A shock-wave generator of a single cavitation bubble. *Instruments and Experimental Techniques*, vol. 46, n° 3, p. 419–423.
- SCHNEIDER, P. F. LEVIEN, K. L. et MORRELL, J. J. (2003). Internal pressure measurement techniques and pressure response in wood during treating processes. *Wood and fiber science*, vol. 35, n° 2, p. 282–292.
- SFERRUZZA, J. P. BIRER, A. et CATHIGNOL, D. (2000). Generation of very high pressure pulses at the surface of a sandwiched piezoelectric material. *Ultrasonics*, vol. 38, n° 10, p. 965–968.
- SIAU, J. F. (1984). *Transport Processes in Wood*. Berlin, Springer-Verlag.
- SIAU, J. F. (1989). *Concise encyclopedia of wood & wood-based materials*. 1st edition édition, chapitre Fluid Transport, p. 112–117, Oxford.
- SKEWS, B. W. KOSING, O. E. et HATTINGH, R. J. (2004). Use of a liquid shock tube as a device for the study of material deformation under impulsive loading conditions. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers – Part C– Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 218, p. 39–51 (2004).
- SKYSCAN (2008). <http://www.skyscan.be/products/2011.htm>.
- SOREK, S. LEVY, A. BEN-DOR, G. et SMEULDERS, D. (1999). Contributions to theoretical/experimental developments in shock waves propagation in porous media. *Transport in porous media*, vol. 34, n° 1, p. 63–100.
- STAMM, A. J. (1973). Penetration of hardwoods by liquids. *Wood Science and Technology*, vol. 7, n° 4, p. 285–296.
- TATE, S. E. et SELLERS, J. W. (2000). Shock wave generator including high speed gas valve.
- THOMPSON, P. A. (1988). *Compressible-Fluid Dynamics*. Troy, RPI, 3^e édition.
- TORGOVNIKOV, G. et VINDEN, P. (2002). A method of microwave treatment of wood. brevet WO 03/002923.

- TORGOVNIKOV, G. et VINDEN, P. (2004). New microwave technology and equipment for wood modification. In *BLDSC - Proceeding of the 4th World Congress on Microwave and Radio Frequency Applications*, p. 91–99, New York (2004).
- TORRENS, R. et WROBEL, L. C. (2003). On the propagation of a normal shock wave through a layer of incompressible porous material. *International journal of numerical methods for heat fluid flow*, vol. 13, n° 2, p. 178–198.
- TSOUMIS, G. (1991). *Science and technology of wood : structure, properties, utilization*. New-York, Van Nostrand Reinhold.
- USDA (1999). Wood handbook : wood as an engineering material. Rapport technique FPL-GTR-113, United State Department of Agriculture Forest Service, Madison.
- WALKER, A. GIBBS, N. LEECH, L. et MARSHALL, J. (2005). *L'encyclopédie du bois*. Hachette Pratique.
- WHITE, F. M. (2003). *Fluid Mechanics*. vol. McGraw-Hill series in mechanical engineering. Boston, E.A. Jones, 5th edition édition.
- WOLFF, C. et DUPUIS, D. (1994). Viscosité. Rapport technique, Techniques de l'ingénieur.
- ZEISER, T. BASHOOR-ZADEH, M. DARABI, A. et BAROUD, G. (2008). Pore-scale analysis of newtonian flow in the explicit geometry of vertebral trabecular bones using lattice boltzmann simulation. *Proc. IMechE. Part H : J. Engineering in Medecine*, vol. 222, p. 1–10.